Environment Canada Environnement Canada

National Hydrology Research Institute

NHRI PAPER NO. 34
IWD SCIENTIFIC SERIES NO. 155

Observations on Ice Cover and Streamflow in the Yukon River near Whitehorse during 1984/85

M.E. Alford* and E.C. Carmack†

*Formerly with:
Water Survey of Canada
Water Resources Branch
Inland Waters Directorate
Pacific and Yukon Region
Whitehorse, Yukon Territory

Current address:
Yukon Expeditions
127 Alsek
Whitehorse, Yukon Territory

†Inland Waters Directorate
National Hydrology Research Institute
National Hydrology Research Centre
Saskatoon, Saskatchewan

Current address:
Fisheries and Oceans Canada
Institute of Ocean Sciences
9860 West Saanich Road
Sidney, British Columbia

NHRI

INLAND WATERS/LANDS DIRECTORATE
NATIONAL HYDROLOGY RESEARCH INSTITUTE
NATIONAL HYDROLOGY RESEARCH CENTRE
SASKATOON, SASKATCHEWAN, 1987
(Disponible en français sur demande)

Published by authority of
the Minister of the Environment

© Minister of Supply and Services Canada 1987
Cat. No. En36-502/155E
ISBN 0-662-15613-7

Contents

	Page
ABSTRACT	v
RÉSUMÉ	v
INTRODUCTION	1
Objectives	1
Study area	1
Measurements	2
OBSERVATIONS AND COMPARISONS	2
Meteorology and hydrology	2
Ice cover distribution	3
Frazil dam characteristics	5
Hydraulic conditions	6
OBSERVATIONS OF SPECIFIC PROCESSES	11
Water temperature changes at freeze-up	11
Shore ice growth	11
Ice front advance	11
Velocity distributions	14
Ice ripple formation	15
DISCUSSION	15
General patterns	15
Frazil dam formation	15
ACKNOWLEDGMENTS	18
REFERENCES	18
APPENDIX Maps illustrating the advance and retreat of the seasonal ice cover during 1984/85	19

Tables

1. Area of ice cover	4
2. Volume and thickness of ice	5
3. Daily values of streamflow, water level, and surface slope during the winter of 1984/85	7
4. Summary comparison of the winters of 1983/84 and 1984/85	15

Illustrations

Page

Figure 1. Study area showing station locations 1
Figure 2. Air temperatures (1983/84 and 1984/85) 2
Figure 3. Barometric pressures (1983/84 and 1984/85) 2
Figure 4. Streamflow (1983/84 and 1984/85) 2
Figure 5. Freezing sequence observed in 1984/85 3
Figure 6. Breakup sequence observed in 1984/85 3
Figure 7. Surface area of ice cover, X4 to GS (November 1984 to April 1985) 4
Figure 8. Ice thickness and volume (November 1984 to April 1985) 5
Figure 9. Frazil dam profiles at M (February to April 1985) 5
Figure 10. Cross-sectional area of frazil dam at M (January to April 1985) 5
Figure 11. Schematic of frazil dam deposition (1984/85) 6
Figure 12. Frazil dam hardness profiles 6
Figure 13. Water levels (October 1984 to May 1985) 6
Figure 14. Surface slopes (October 1984 to April 1985) 7
Figure 15. Relative gauge heights at AM, M, and BM at selected times 7
Figure 16. Water level at AM in relation to ice front position 7
Figure 17. Water temperature gradients prior to freeze-up 11
Figure 18. Shore ice showing diurnal frazil deposit 12
Figure 19. Shore ice showing dendritic features along the edge 12
Figure 20. Air temperature and growth of shore ice at open section at M (January to March 1985) 13
Figure 21. Shore ice growth rate in relation to air temperature 13
Figure 22. Schematic of structural changes in the growth of shore ice 13
Figure 23. Ice front advance (1983/84 and 1984/85) 13
Figure 24. Velocity profiles behind lead 14
Figure 25. Frazil deposition behind lead 14
Figure 26. Velocity profiles below smooth ice and below frazil dam 14
Figure 27. Bottom of ice showing no features (March 13, 1985) 16
Figure 28. Ripples beginning to form (March 28, 1985) 16
Figure 29. Crests becoming strongly undulated (April 2, 1985) 17
Figure 30. Crests becoming discontinuous and broken (April 8, 1985) 17

Abstract

The objective of the Yukon Ice Seasonality Experiment (YISEX) is to obtain an understanding of physical processes affecting ice cover on northern lake and river systems. Towards this goal, observations of the hydrology and ice regime along a 4.3-km reach of the Yukon River at Whitehorse were initiated during the winter of 1983/84.

A report is given here of the second year (1984/85) of measurements obtained at the Whitehorse reach. Differences in ice cover evolution (e.g., freeze-up patterns, ice front advance, frazil dam growth, and ripple development) caused by different weather patterns and the effects of specific ice conditions (e.g., core leads, ice fronts, and ice ripples) on the distribution of velocity are discussed. A summary comparison of the two winters is presented.

Résumé

L'objectif de l'Expérience de saisonnalité glacielle du Yukon (ESAGY) est de comprendre les processus physiques qui influent sur la couche de glace à la surface de l'ensemble des lacs et des rivières du Nord. Pour réaliser cet objectif, on a commencé à faire des études de l'hydrologie et du régime des glaces le long d'un bief de 4.3 km du fleuve Yukon à Whitehorse au cours de l'hiver 1983-1984.

Ce rapport porte principalement sur les observations de la seconde année d'étude (1984-1985) du bief de Whitehorse. Nous analysons les différences de l'évolution de la couche de glace (par exemple, régimes de gel, progression des fronts de glace, croissance de barrages de frasil et formation de glaces ondulées). Les différents régimes climatiques et les effets des conditions spécifiques de la glace (par exemple, chenaux non gelés, fronts de glace, ondulations de glace) sur la répartition de l'écoulement sont la cause de ce phénomène. On présente une comparaison sommaire des observations du premier hiver au second.

Observations on Ice Cover and Streamflow in the Yukon River near Whitehorse during 1984/85

M.E. Alford and E.C. Carmack

INTRODUCTION

Objectives

The overall goal of the Yukon Ice Seasonality Experiment (YISEX) is to acquire an overview of processes affecting the seasonal ice cover on rivers and lakes of the Yukon River basin. To this end, a study of the ice regime and hydrology along a 4.3-km reach of the Yukon River near Whitehorse was carried out during the winter of 1983/84 (see Alford and Carmack, 1987). This program was extended into a second year with the objective of obtaining a comparison of ice and hydraulic features under different weather patterns.

Here we compare environmental conditions observed in 1983/84 with those of 1984/85 and focus on certain processes that appear to have an important effect on the seasonal ice cycle. Because the winter of 1984/85 was characterized by relatively mild temperatures and higher than average snowfall, the effect of such climatic conditions on the formation of ice could be compared with observations from the previous winter, especially with regard to

(1) the process and pattern of freeze-up, including factors controlling the growth of shore ice;

(2) rates of growth and decay of frazil dams, including changes in their physical properties;

(3) the effects of ice formation and ice front advance on water levels, flow resistance, and vertical profiles of velocity; and

(4) the process and pattern of breakup, including the formation of ripples at the ice/water interface.

Study Area

That part of the Yukon River selected for study extends from the Robert Campbell Bridge at the south end of Whitehorse to the narrows located 4.3 km downstream (Fig. 1). Here, the river drains an area of about 19 400 km^2 and has an annual streamflow of about 240 $m^3 s^{-1}$. The average slope of the river through the reach is 0.5×10^{-3}.

Figure 1. Study area showing station locations.

The flow of the Yukon River has been modified by the construction of two upstream dams. The first, located below the outlet of Marsh Lake, provides some upstream storage. The second, located at Whitehorse Rapids, is a hydroelectric power station. At present the streamflow at Whitehorse is regulated at the lower dam, subject to structural and legal limitations. Specifically, water levels behind the dam (Schwatka Lake) cannot rise above 653.34 m or fall below 652.27 m.

Measurements

Water level was recorded daily at four stations during freeze-up and at three stations for the duration of the winter period. The three locations were the same as those used for the 1983/84 program (AM, M, and BM), while the fourth location was at X4. At each of the locations, measurements were obtained of ice thickness and area, frazil accumulation, frazil hardness, and water velocity at various times throughout the winter. To minimize aliasing problems associated with diurnal variations in water level, all readings were taken at approximately the same time each day. Details of the measurement techniques are given in Alford and Carmack (1987).

Daily values of streamflow were obtained as the total amount of water passing the dam as recorded at the Whitehorse Rapids hydro site (also referred to as "generating station" or GS).

Prior to the onset of freezing, water temperatures were obtained at selected sites extending from the generating station to BM using an expanded-scale mercury thermometer accurate to ±0.1°C.

Air temperature and barometric pressure were recorded at 07:00 at the Alford residence in Riverdale located approximately 1 km from the study reach and within 10 m of river level. We also note that standard meteorological observations, including air temperature, barometric pressure, humidity, wind velocity, and shortwave radiation were recorded at Whitehorse Airport, also located about 1 km from the river, but 61 m above river level. While these data are not reported here, they are obtainable from the Atmospheric Environment Service.

Structural features of the ice were photographed whenever possible. For example, to obtain more detailed information on physical changes that take place on the underside of ice, several blocks were cut using a Swedish ice saw; these were then inverted, spray-painted black, and photographed.

OBSERVATIONS AND COMPARISONS

Meteorology and Hydrology

Comparisons of air temperatures and barometric pressures for the two study years are shown in Figures 2 and 3 respectively. Both winters were milder than normal, however, the winter of 1984/85 was notably warmer than that of the previous year.

A second major difference in meteorological conditions was the higher than average snowfall in 1984/85, especially during the critical months of freeze-up. This is important because snow acts as an insulator, and generally slows the rate of ice growth.

A comparison of streamflow for the two study years (Fig. 4) shows two differences: the flow during 1984/85 was both higher (about 10%) and more variable than the previous year. Since flow can be controlled within narrow limits by the dam at Whitehorse Rapids, any adjustments

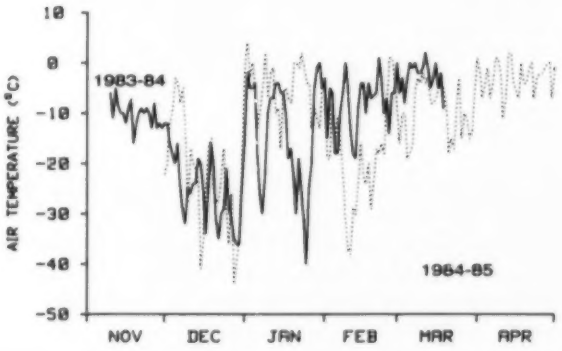


Figure 2. Air temperatures (1983/84 and 1984/85).

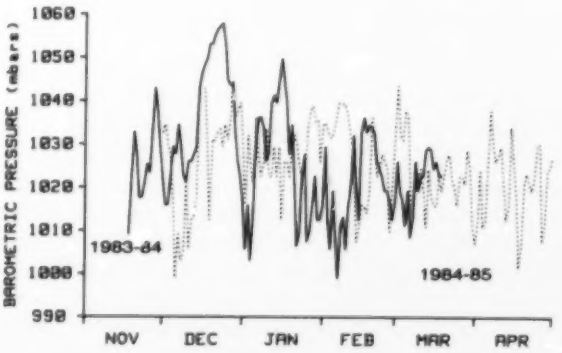


Figure 3. Barometric pressures (1983/84 and 1984/85).

Figure 4. Streamflow (1983/84 and 1984/85).

made for the purpose of turbine maintenance, calibration, and switching can result in short-duration fluctuations in streamflow. During 1984/85 a fourth wheel was placed on-line to allow maintenance of the older turbines; the observed fluctuations are likely related to the phase-in of this turbine.

Ice Cover Distribution

The freezing sequence observed in 1984/85 is summarized in Figure 5 (see also Appendix). Shorefast ice began forming in the back channels of the river in early November. By November 9 it lined most of the reach.

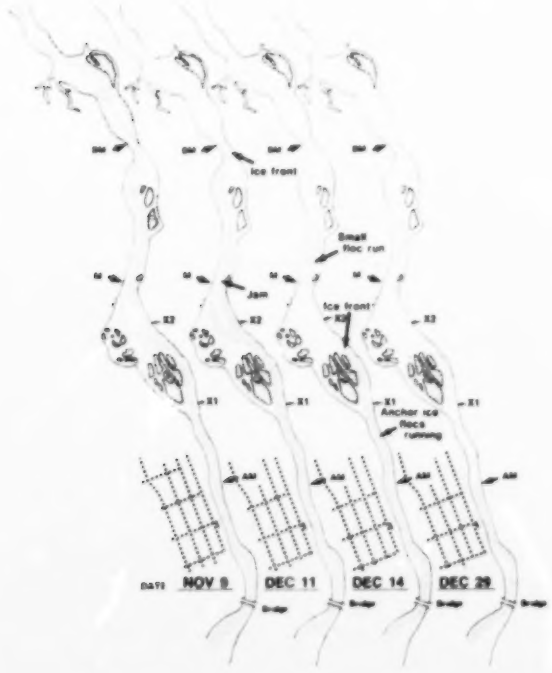


Figure 5. Freezing sequence observed in 1984/85.

The rest of the freeze-up was characterized by a combination of shore ice closing in, thus forming a narrow channel along the velocity core, and the progressive advance of an ice front due to the deposition of frazil flocs, pans, and floes formed farther upstream. On December 11 the ice front moved past BM, and a midchannel jam formed at M. By December 14 the main front had moved to a point midway between X2 and X1. However, a large area of open water remained near M. By December 29 the ice front had progressed upstream from AM. We define freeze-up for this reach as the time the ice front advanced to AM. In 1983/84 the ice front advanced to AM on January 2, roughly the same time as in 1984/85.

Maximum ice coverage occurred between February 12 and March 13. The open lead in the proximity of M remained through most of the winter, not freezing until February 12. Another lead remained in place above the Robert Campbell Bridge throughout the winter. This latter feature has become a common occurrence as the bridge pier initiates the formation of an ice jam on its upstream side. Ice cover invariably extends to the first bend above the bridge, but no farther.

Ice cover conditions during midwinter and spring are shown in Figure 6 (see also Appendix). The first signs of breakup in late March and early April included the appearance of small patches of overflow and the accumulation of pans of broken ice into jams. By April 8 significant thermal leads had appeared along the reach. By April 12 the reach was essentially open, except for a minor jam at BM, and only shore and grounded ice remained. We define breakup for this reach as the time the reach was open to BM. In 1983/84 the reach opened on March 29, approximately two weeks earlier than in 1984/85.

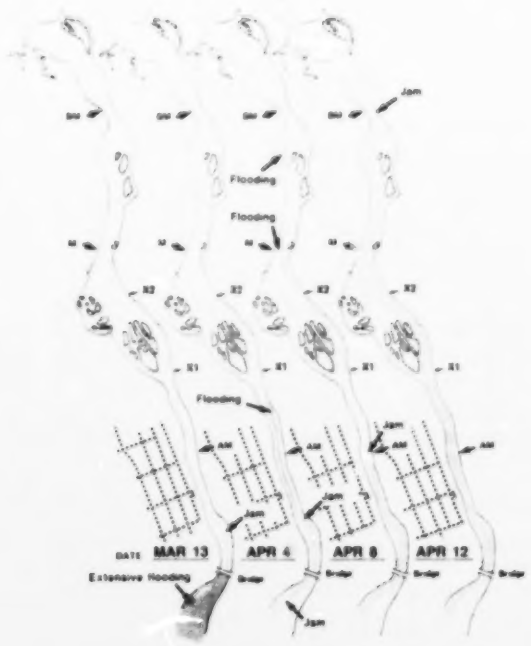


Figure 6. Breakup sequence observed in 1984/85.

Daily values of areal ice cover were computed from the maps shown in the Appendix and are listed in Table 1.

Table 1. Area of Ice Cover

Date	X4 to GS		AM to M	
	(km^2)	(%)	(km^2)	(%)
84-11-09	0.8542	51.0	0.2857	63.9
84-11-17	0.8987	53.6	0.2889	64.6
84-11-20	0.9255	55.2	0.2944	65.8
84-11-21	0.9326	55.6	0.2944	65.8
84-11-26	0.9554	57.0	0.2970	66.4
84-11-29	0.9862	58.8	0.2983	66.7
84-12-02	0.9989	59.6	0.3049	68.2
84-12-03	1.0215	61.0	0.3096	69.2
84-12-04	1.0289	61.4	0.3128	69.9
84-12-05	1.0568	63.1	0.3148	70.4
84-12-06	1.0575	63.1	0.3154	70.5
84-12-07	1.0920	65.2	0.3170	70.9
84-12-08	1.0920	65.2	0.3170	70.9
84-12-09	1.1388	68.0	0.3185	71.2
84-12-10	1.1408	68.1	0.3237	72.4
84-12-11	1.1414	68.1	0.3284	73.4
84-12-12	1.1440	68.3	0.3289	73.5
84-12-13	1.1472	68.5	0.3318	74.2
84-12-14	1.2159	72.6	0.3849	86.0
84-12-15	1.2192	72.8	0.4018	89.8
84-12-16	1.2298	73.4	0.4026	90.0
84-12-17	1.2387	73.9	0.4051	90.5
84-12-18	1.2387	73.9	0.4051	90.5
84-12-19	1.2684	75.5	0.4195	93.8
84-12-20	1.2648	75.5	0.4195	93.8
84-12-21	1.2648	75.5	0.4195	93.8
84-12-22	1.2769	76.2	0.4259	95.2
84-12-23	1.2769	76.2	0.4259	95.2
84-12-24	1.2801	76.4	0.4305	96.2
84-12-25	1.2960	77.3	0.4336	96.9
84-12-26	1.2982	77.5	0.4341	97.0
84-12-27	1.3018	77.7	0.4380	97.9
84-12-28	1.3057	77.9	0.4387	98.1
84-12-29	1.3060	77.9	0.4410	99.3
84-12-30	1.3224	78.9	0.4457	99.6
84-12-31	1.3236	79.0	0.4464	99.8
85-01-01	1.3372	79.8	0.4465	99.8
85-01-02	1.3430	80.1	0.4465	99.8
85-01-03	1.3430	80.1	0.4465	99.8
85-01-04	1.3487	80.5	0.4466	99.8
85-01-05	1.3487	80.5	0.4466	99.8
85-01-06	1.3487	80.5	0.4466	99.8
85-01-07	1.3487	80.5	0.4466	99.8
85-01-08	1.3487	80.5	0.4466	99.8
85-01-09	1.3632	81.3	0.4466	99.8
85-01-10	1.3632	81.3	0.4466	99.8
85-01-11	1.3653	81.5	0.4467	99.8
85-01-12	1.3653	81.5	0.4467	99.8
85-01-13	1.3653	81.5	0.4467	99.8
85-01-14	1.3654	81.5	0.4467	99.8
85-01-15	1.3690	81.7	0.4467	99.8
85-01-24	1.3697	81.7	0.4468	99.9
85-02-08	1.3758	82.1	0.4468	99.9
85-02-10	1.3788	82.3	0.4468	99.9
85-02-12	1.3811	82.4	0.4468	99.9

Table 1. Continued

Date	X4 to GS		AM to M	
	(km^2)	(%)	(km^2)	(%)
85-02-25	1.4114	84.2	0.4471	99.9
85-03-03	1.4154	84.5	0.4471	99.9
85-03-13	1.4186	84.7	0.4472	100.0
85-03-15	1.4145	84.4	0.4473	100.0
85-03-21	1.3996	83.5	0.4474	100.0
85-03-22	1.3956	83.3	0.4474	100.0
85-03-26	1.3834	82.5	0.4474	100.0
85-03-29	1.3437	80.2	0.4474	100.0
85-04-01	1.3363	79.7	0.4474	100.0
85-04-04	1.3132	78.4	0.4474	100.0
85-04-05	1.2990	77.5	0.4474	100.0
85-04-06	1.2737	76.0	0.4474	100.0
85-04-07	1.2404	74.0	0.4323	96.6
85-04-08	1.2290	73.3	0.4143	92.6
85-04-09	1.1273	67.3	0.3472	77.6
85-04-10	1.0793	64.4	0.3310	74.0
85-04-11	0.9630	57.5	0.3163	70.7
85-04-12	0.9336	55.7	0.3090	69.1
85-04-13	0.8582	51.2	0.2780	62.1
85-04-16	0.7135	42.6	0.2345	52.4

The corresponding plot of ice cover growth between X4 and GS (Fig. 7) shows a rapid increase in cover early on, followed by a much slower increase later. This pattern is similar to that observed in 1984/85.

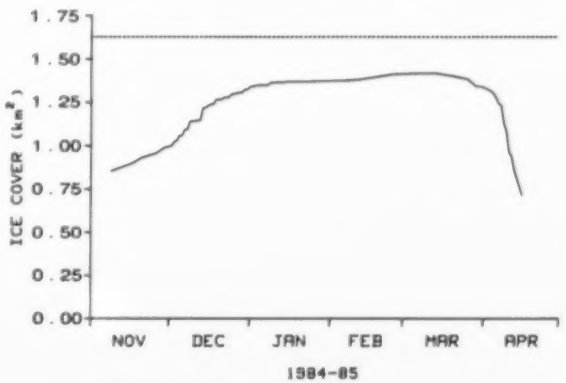


Figure 7. Surface area of ice cover, X4 to GS (November 1984 to April 1985).

Figure 8 and Table 2 show the mean ice thickness at M at six times during the study. Also shown is an estimate of the total volume of surface ice within the reach taken as the product of areal coverage times mean thickness at M. Both curves follow a similar trend with moderate growth during freeze-up, steady conditions in midwinter, and rapid losses at breakup.

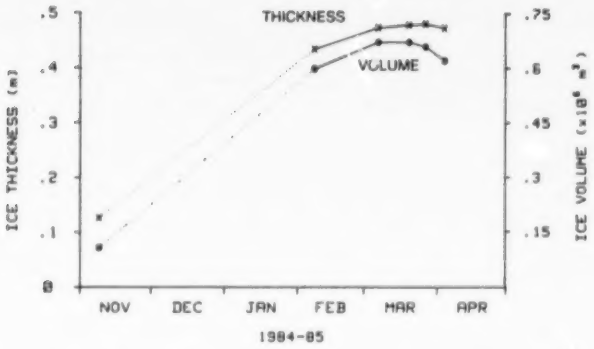


Figure 8. Ice thickness and volume (November 1984 to April 1985).

The ice cover in 1984/85 was about 0.3 m thinner than that observed in 1983/84 as a result of milder temperatures and heavier snow cover.

Table 2. Volume and Thickness of Ice

Date	Volume (m^3) X4 to GS	Volume (m^3) AM to M	Thickness (m) M
84-11-09	108 244	36 204	0.127
85-02-08	597 097	193 911	0.434
85-03-07	670 099	211 526	0.473
85-03-20	670 204	213 809	0.478
85-03-27	657 696	214 752	0.480
85-04-04	619 830	211 173	0.472

Frazil Dam Characteristics

Frazil dams are defined as mass accumulations of frazil ice particles or slush on the undersides of ice covers. The frazil itself is formed in turbulent, open water areas upstream from the stable ice cover during periods of intense cooling, i.e., at air temperatures of -20°C or colder. (For reviews, see Osterkamp, 1978; Martin, 1981; and Tsang, 1982.) Whether or not frazil adheres at a given location depends upon flow velocity, ice cover roughness, and its own state of "stickiness," determined by whether it is at 0°C or below.

The frazil dam at Whitehorse was discussed by Alford and Carmack (1987). It was noted that the dam appeared to form every year and that the basic shape of the dam was constant from year to year. It was also observed that the cross-sectional area of the dam appeared to reach its limit during the freeze-up period and to decrease thereafter, slowly in midwinter and rapidly just prior to breakup.

Figure 9 shows the ice and frazil horizons observed at M, Figure 10 shows the cross-sectional area of the dam over a period of time. These measurements show a pattern of growth and decay similar to that observed in 1983/84.

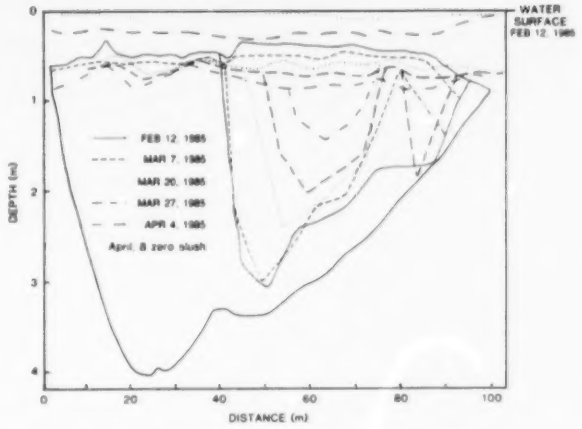


Figure 9. Frazil dam profiles at M (February to April 1985).

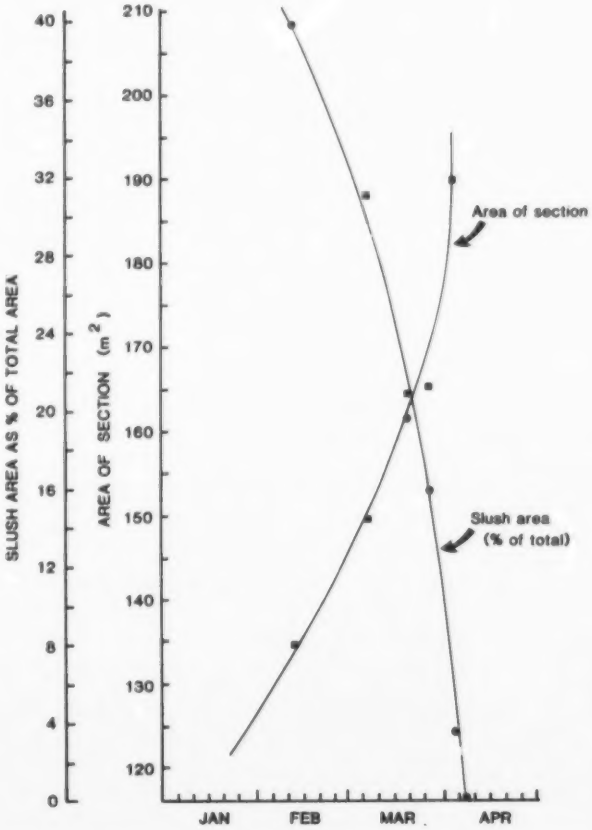


Figure 10. Cross-sectional area of frazil dam at M (January to April 1985).

Additional frazil dam profiles were obtained at AM, X3, BM, and at a section immediately below the open lead at M (Fig. 11). These data show the dam to be continuous along the reach and occupying a volume roughly equal to that of sheet ice. In the middle portion of the reach, slush appears to be absent along the axis of the velocity core. At AM and BM, however, the dam is thickest at midchannel where flow velocities are highest. Our feeling is that when frazil adheres to the ice immediately above the velocity core, and thus acts to divert the flow from its preferred channel, the hydraulic resistance of the reach will be higher than in cases where deposition occurs to the side of the velocity core. This hypothesis, however, requires further study.

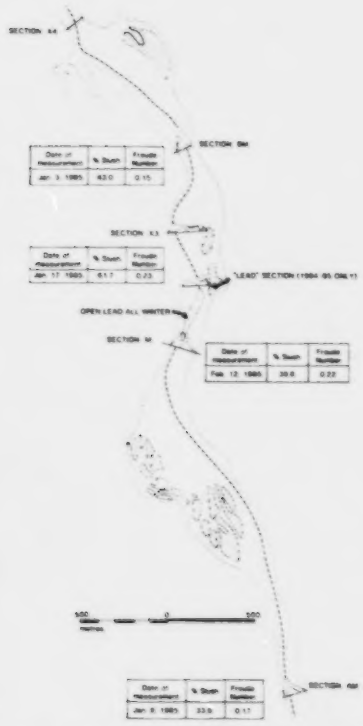


Figure 11. Schematic of frazil dam deposition (1984/85).

Two vertical profiles of frazil dam hardness were taken at BM using a slush rammsonde (Alford and Carmack, 1987). These data (Fig. 12) show a middepth maximum in relative hardness similar to that observed in 1983/84. The morphological reason for this feature is currently unknown.

Hydraulic Conditions

Observations of water level were recorded daily throughout the winter at AM, M, and BM, and for a short

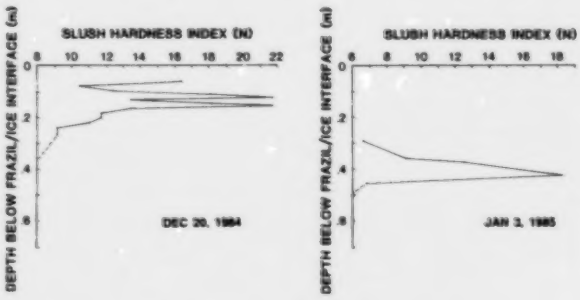


Figure 12. Frazil dam hardness profiles.

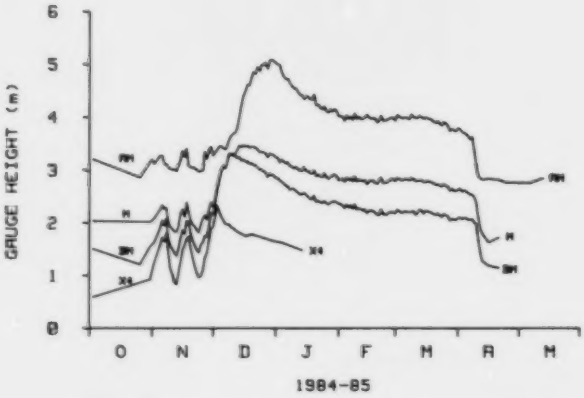


Figure 13. Water levels (October 1984 to May 1985).

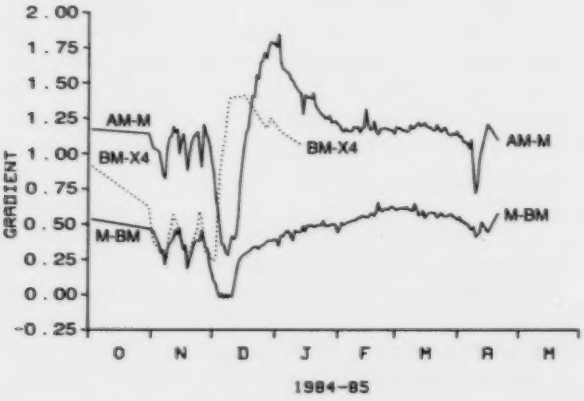


Figure 14. Surface slopes (October 1984 to April 1985).

period during freeze-up at X4. During freeze-up the hydraulic resistance of a river generally increases, requiring a corresponding increase in the depth of flow. Similarly, the overall resistance decreases subsequent to breakup. These effects on resistance are evident from the water level data shown in Figure 13 and Table 3. Water levels at all stations increased rapidly at freeze-up, declined gradually during winter, and fell sharply following breakup. Similarly, observations of surface slope (Fig. 14) reveal significant variations throughout the winter with the largest slopes and most rapid variations occurring at freeze-up. The variation in water level at selected times during the winter cycle is illustrated in Figure 15.

The effect of the advancing ice front on water level (the backwater effect) is shown in Figure 16. Here, the water level at AM is plotted according to the position of the ice front within the reach. Note that a slight backwater effect occurred as the ice front passed BM, and that a much larger effect occurred as the front reached the vicinity of X2. This behaviour is relevant to concerns for flooding.

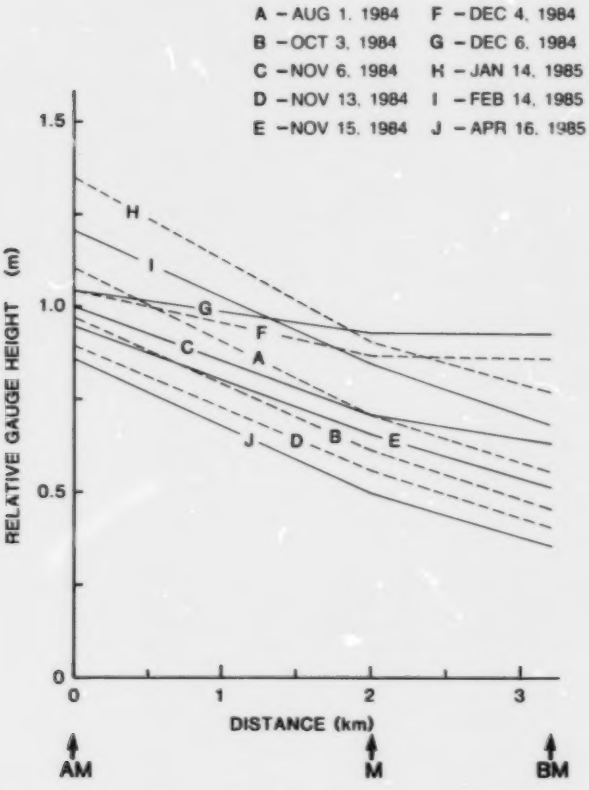


Figure 15. Relative gauge heights at AM, M, and BM at selected times.

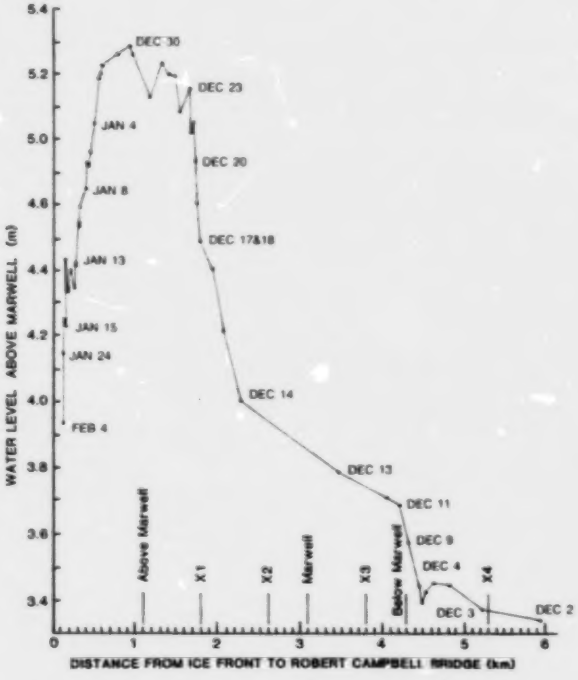


Figure 16. Water level at AM in relation to ice front position.

Table 3. Daily Values of Streamflow, Water Level, and Surface Slope during the Winter of 1984/85

Date	Streamflow ($m^3 s^{-1}$)	Water level				Surface slope		
		AM (m)	M (m)	BM (m)	X4 (m)	AM-M (m)	M-BM (m)	BM-X4 (m)
84-10-03	217	3.200	2.031	1.498	0.590	1.169	0.533	0.908
84-10-26	144	2.860	–	1.207	–	–	–	–
84-10-31	166	3.155	2.015	1.548	0.924	1.140	0.467	0.624
84-11-01	177	3.200	–	–	–	–	–	–
84-11-02	188	3.120	2.080	1.628	1.245	1.040	0.452	0.383

Table 3. Continued

Date	Streamflow ($m^3 s^{-1}$)	Water level				Surface slope		
		AM (m)	M (m)	BM (m)	X4 (m)	AM-M (m)	M-BM (m)	BM-X4 (m)
84-11-05	158	3.270	2.256	1.902	1.585	1.014	0.354	0.317
84-11-06	160	3.276	2.337	2.043	1.722	0.939	0.294	0.321
84-11-07	164	3.120	2.266	1.950	1.648	0.854	0.316	0.302
84-11-08	165	3.110	2.289	2.076	1.800	0.821	0.316	0.302
84-11-09	161	3.050	2.019	1.697	1.445	1.031	0.322	0.252
84-11-10	158	3.030	1.921	1.563	1.130	1.109	0.358	0.433
84-11-11	159	3.000	1.879	1.500	1.020	1.121	0.379	0.480
84-11-12	159	3.020	1.831	1.432	0.865	1.189	0.399	0.567
84-11-13	156	2.980	1.831	1.373	0.830	1.149	0.458	0.543
84-11-14	157	3.102	1.931	1.504	–	1.171	0.427	–
84-11-15	157	3.180	2.182	1.705	–	0.998	0.477	–
84-11-16	157	3.360	2.251	1.866	1.485	1.109	0.385	0.381
84-11-17	159	3.250	2.111	1.791	–	1.139	0.320	–
84-11-18	161	3.410	2.391	2.041	1.695	1.019	0.350	0.346
84-11-19	159	3.080	2.201	2.016	1.740	0.879	0.185	0.276
84-11-20	159	3.050	2.041	1.793	1.510	1.009	0.248	0.283
84-11-21	159	3.040	1.961	1.668	1.340	1.079	0.293	0.328
84-11-22	159	3.045	1.926	1.574	1.185	1.119	0.352	0.389
84-11-23	164	3.000	1.866	1.484	1.055	1.134	0.382	0.429
84-11-24	160	2.970	1.816	1.435	0.960	1.154	0.381	0.475
84-11-25	159	2.990	1.961	1.580	0.990	1.029	0.381	0.590
84-11-26	160	2.990	2.086	1.630	1.090	0.904	0.456	0.540
84-11-27	157	3.345	2.141	1.751	1.330	1.204	0.390	0.421
84-11-28	158	3.210	2.061	1.731	1.430	1.149	0.330	0.301
84-11-29	155	3.380	2.271	1.947	1.660	1.109	0.324	0.287
84-11-30	156	3.440	2.386	2.177	1.890	1.054	0.209	0.287
84-12-01	155	3.275	2.326	2.172	1.925	0.949	0.154	0.247
84-12-02	149	3.330	2.461	2.263	2.125	0.869	0.098	0.238
84-12-03	146	3.375	2.681	2.603	2.330	0.694	0.078	0.273
84-12-04	141	3.440	2.841	2.823	2.210	0.599	0.018	0.613
84-12-05	148	3.450	2.976	2.995	2.118	0.474	–0.019	0.877
84-12-06	156	3.420	3.066	3.059	2.055	0.354	0.007	1.004
84-12-07	156	3.390	3.036	3.062	1.980	0.354	–0.026	1.082
84-12-08	155	3.450	3.156	3.155	1.970	0.294	0.001	1.185
84-12-09	155	3.570	3.291	3.315	1.965	0.279	–0.022	1.348
84-12-10	150	3.650	3.296	3.303	1.910	0.354	–0.007	1.393
84-12-11	146	3.685	3.271	3.288	1.900	0.414	–0.017	1.388
84-12-12	152	3.705	3.311	3.260	1.860	0.394	0.051	1.400
84-12-13	145	3.790	3.371	3.228	1.830	0.419	0.143	1.398
84-12-14	141	4.000	3.461	3.243	–	0.539	0.218	–
84-12-15	141	4.220	3.431	3.178	–	0.789	0.253	–
84-12-16	147	4.400	3.471	3.198	–	0.929	0.273	–
84-12-17	143	4.490	3.441	3.158	1.745	1.049	0.283	1.413
84-12-18	147	4.610	3.461	3.168	–	1.149	0.293	–
84-12-19	145	4.600	3.421	3.118	–	1.170	0.303	–
84-12-20	143	4.740	3.441	3.128	1.780	1.299	0.313	1.348
84-12-21	144	4.850	3.441	3.108	–	1.409	0.333	–
84-12-22	144	4.820	3.421	3.083	–	1.300	0.338	–
84-12-23	142	4.945	3.391	3.048	–	1.554	0.343	–
84-12-24	141	4.870	3.341	3.018	–	1.529	0.323	–
84-12-25	142	4.986	3.341	2.998	–	1.645	0.343	–
84-12-26	142	4.990	3.331	2.983	–	1.659	0.348	–
84-12-27	142	5.030	3.316	2.958	–	1.714	0.358	–
84-12-28	142	4.915	3.241	2.868	1.690	1.674	0.373	1.178
84-12-29	143	5.065	3.311	2.928	–	1.754	0.383	–

Table 3. Continued

Date	Streamflow ($m^3 s^{-1}$)	Water level				Surface slope		
		AM (m)	M (m)	BM (m)	X4 (m)	AM-M (m)	M-BM (m)	BM-X4 (m)
84-12-30	141	5.085	3.296	2.913	1.660	1.789	0.383	1.253
84-12-31	140	5.060	3.281	2.898	–	1.779	0.383	–
85-01-01	138	5.025	3.241	2.848	–	1.784	0.393	–
85-01-02	140	4.995	3.241	2.854	–	1.754	0.387	–
85-01-03	141	4.984	3.141	2.796	–	1.843	0.345	–
85-01-04	142	4.845	3.196	2.779	1.625	1.649	0.417	1.154
85-01-05	140	4.760	3.161	2.747	–	1.599	0.414	–
85-01-06	139	4.720	3.131	2.700	–	1.589	0.431	–
85-01-07	139	4.725	3.151	2.696	–	1.574	0.455	–
85-01-08	139	4.644	3.076	2.627	–	1.568	0.449	–
85-01-09	140	4.590	3.065	2.647	–	1.525	0.418	–
85-01-10	139	4.545	3.031	2.647	–	1.514	0.384	–
85-01-11	138	4.540	3.061	2.607	–	1.479	0.454	–
85-01-12	140	–	–	–	–	–	–	–
85-01-13	135	4.420	2.981	2.537	–	1.439	0.444	–
85-01-14	136	4.415	2.991	2.544	1.480	1.424	0.447	1.064
85-01-15	134	4.340	2.061	2.574	–	1.279	0.487	–
85-01-16	137	4.400	2.986	2.538	–	1.414	0.448	–
85-01-17	140	4.390	2.991	2.499	–	1.399	0.492	–
85-01-18	136	4.340	2.941	2.455	–	1.399	0.486	–
85-01-19	133	4.330	2.941	2.444	–	1.389	0.497	–
85-01-20	132	4.430	3.001	2.517	–	1.429	0.484	–
85-01-21	122	4.225	2.881	2.399	–	1.344	0.482	–
85-01-22	135	4.240	2.921	2.425	–	1.319	0.496	–
85-01-23	132	4.180	2.881	2.389	–	1.299	0.492	–
85-01-24	132	4.150	2.871	2.378	–	1.279	0.493	–
85-01-25	133	4.210	2.943	2.418	–	1.267	0.525	–
85-01-26	134	4.110	2.861	2.373	–	1.249	0.488	–
85-01-27	132	4.085	2.836	2.348	–	1.249	0.488	–
85-01-28	134	4.150	2.881	2.388	–	1.269	0.493	–
85-01-29	140	4.110	2.891	2.394	–	1.219	0.497	–
85-01-30	132	4.150	2.921	2.419	–	1.229	0.502	–
85-01-31	138	4.120	2.891	2.394	–	1.229	0.497	–
85-02-01	136	4.020	2.811	2.369	–	1.209	0.442	–
85-02-02	137	4.020	2.821	2.355	–	1.199	0.466	–
85-02-03	133	4.010	2.841	2.330	–	1.169	0.511	–
85-02-04	137	3.930	2.776	2.280	–	1.154	0.496	–
85-02-05	134	4.035	2.856	2.350	–	1.179	0.506	–
85-02-06	136	3.970	2.811	2.296	–	1.159	0.515	–
85-02-07	133	4.010	2.851	2.335	–	1.159	0.516	–
85-02-08	133	3.950	2.791	2.266	–	1.159	0.525	–
85-02-09	132	4.070	2.881	2.355	–	1.189	0.526	–
85-02-10	132	3.965	2.781	2.251	–	1.184	0.530	–
85-02-11	133	4.010	2.821	2.276	–	1.189	0.545	–
85-02-12	129	3.960	2.811	2.266	–	1.149	0.545	–
85-02-13	128	3.970	2.791	2.231	–	1.179	0.560	–
85-02-14	130	3.995	2.811	2.256	–	1.184	0.555	–
85-02-15	129	4.045	2.731	2.181	–	1.314	0.550	–
85-02-16	131	3.990	2.791	2.242	–	1.199	0.549	–
85-02-17	128	3.970	2.801	2.231	–	1.169	0.570	–
85-02-18	129	3.980	2.806	2.227	–	1.174	0.579	–
85-02-19	127	3.980	2.751	2.192	–	1.229	0.559	–
85-02-20	127	3.898	2.741	2.152	–	1.157	0.589	–
85-02-21	125	3.935	2.801	2.147	–	1.134	0.654	–
85-02-22	125	4.030	2.856	2.257	–	1.174	0.599	–

Table 3. Continued

Date	Streamflow ($m^3 s^{-1}$)	Water level				Surface slope		
		AM (m)	M (m)	BM (m)	X4 (m)	AM-M (m)	M-BM (m)	BM-X4 (m)
85-02-23	121	3.926	2.753	2.162	–	1.173	0.591	–
85-02-24	120	3.940	2.761	2.152	–	1.179	0.609	–
85-02-25	121	3.950	2.771	2.162	–	1.179	0.609	–
85-02-26	127	3.970	2.801	2.197	–	1.169	0.604	–
85-02-27	129	3.990	2.824	2.202	–	1.166	0.622	–
85-02-28	131	3.990	2.826	2.201	–	1.164	0.625	–
85-03-01	130	3.930	2.791	2.181	–	1.139	0.610	–
85-03-02	138	4.040	2.851	2.250	–	1.189	0.601	–
85-03-03	137	4.010	2.831	2.220	–	1.179	0.611	–
85-03-04	137	3.980	2.801	2.189	–	1.179	0.612	–
85-03-05	136	3.980	2.816	2.199	–	1.164	0.617	–
85-03-06	145	3.990	2.826	2.218	–	1.164	0.608	–
85-03-07	143	3.980	2.826	2.203	–	1.154	0.623	–
85-03-08	144	3.960	2.801	2.197	–	1.159	0.604	–
85-03-09	149	4.050	2.851	–	–	1.199	–	–
85-03-10	150	4.000	2.821	2.225	–	1.179	0.596	–
85-03-11	153	3.980	2.791	2.145	–	1.189	0.646	–
85-03-12	151	3.990	–	–	–	–	–	–
85-03-13	153	4.030	2.811	2.249	–	1.219	0.562	–
85-03-14	150	4.000	2.806	2.233	–	1.194	0.573	–
85-03-15	150	3.970	2.766	2.170	–	1.204	0.596	–
85-03-16	153	3.995	2.776	2.232	–	1.219	0.544	–
85-03-17	153	3.980	2.791	2.221	–	1.189	0.570	–
85-03-18	152	3.970	2.781	2.200	–	1.189	0.581	–
85-03-19	152	3.950	2.771	2.190	–	1.179	0.581	–
85-03-20	150	3.910	2.741	2.160	–	1 169	0.581	–
85-03-21	150	3.895	2.731	2.150	–	1.164	0.581	–
85-03-22	148	3.930	2.726	2.180	–	1.204	0.546	–
85-03-23	146	3.875	2.701	2.140	–	1.174	0.561	–
85-03-24	149	3.845	2.691	2.110	–	1.154	0.581	–
85-03-25	147	3.910	2.731	2.170	–	1.179	0.561	–
85-03-26	133	3.880	2.696	2.140	–	1.184	0.556	–
85-03-27	135	3.835	2.686	2.130	–	1.149	0.556	–
85-03-28	125	3.740	2.606	2.040	–	1.134	0.566	–
85-03-29	128	3.780	2.651	2.078	–	1.129	0.573	–
85-03-30	124	3.750	2.606	2.053	–	1.144	0.553	–
85-03-31	122	3.740	2.606	2.058	–	1.134	0.548	–
85-04-01	124	3.790	2.631	2.098	–	1.159	0.533	–
85-04-02	131	3.770	2.651	2.098	–	1.119	0.553	–
85-04-03	133	3.720	2.596	2.078	–	1.124	0.518	–
85-04-04	127	3.700	2.616	2.093	–	1.084	0.523	–
85-04-05	126	3.680	2.601	2.098	–	1.079	0.503	–
85-04-06	124	3.640	2.561	2.058	–	1.079	0.503	–
85-04-07	126	3.580	2.541	2.063	–	1.039	0.478	–
85-04-08	127	3.630	2.531	2.068	–	1.099	0.463	–
85-04-09	128	3.380	2.491	2.008	–	0.889	0.483	–
85-04-10	134	3.100	2.381	1.969	–	0.719	0.412	–
85-04-11	116	2.890	2.111	1.686	–	0.779	0.425	–
85-04-12	111	2.840	1.881	1.436	–	0.959	0.445	–
85-04-13	112	2.820	1.791	1.276	–	1.029	0.515	–
85-04-16	116	2.840	1.631	1.186	–	1.209	0.445	–
85-04-19	110	2.820	–	–	–	–	–	–
85-04-21	119	2.820	1.721	1.146	–	1.099	0.575	–
85-04-24	–	2.770	–	–	–	–	–	–
85-05-06	–	2.750	–	–	–	–	–	–
85-05-13	–	2.840	–	–	–	–	–	–

OBSERVATIONS OF SPECIFIC PROCESSES

Alford and Carmack (1987) identified several phenomena affecting ice cover development and streamflow within the reach. In the present study, additional observations were made to study certain of these processes in greater detail.

Water Temperature Changes at Freeze-up

Changes in water temperature along the reach at different times during freeze-up are shown in Figure 17. Typically, the temperature changed by about 0.3°C between the bridge and BM, yielding a longitudinal temperature gradient dT/dL = 0.07°C/km, where T is water temperature and L is the distance along the reach.

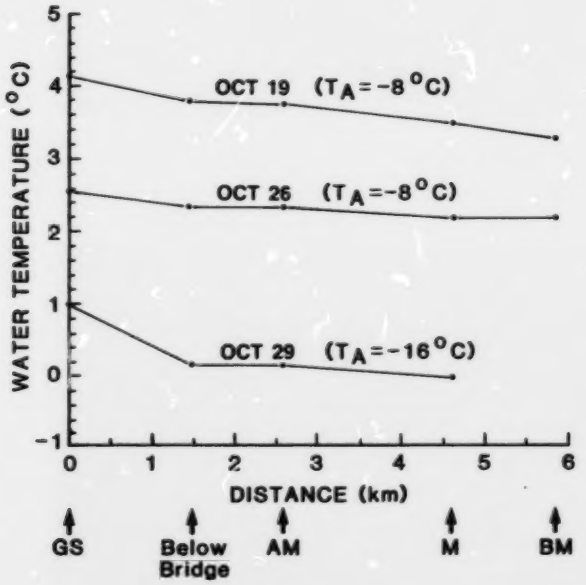


Figure 17. Water temperature gradients prior to freeze-up. (T_A denotes the corresponding air temperature.)

How large must the surface heat flux be to account for the observed longitudinal temperature gradient? Taking the mean velocity <V> = 0.7 m/s, we note that a column of water moving through the reach cools at a rate of dT/dt = <V> dT/dL, or about 0.5 x 10^{-4}°C/s. Taking the mean depth of the reach to be 2 m, a surface heat flux of 390 W m^{-2} is obtained. This value should be considered as a rough estimate only, but is in agreement with previous heat flux measurements by Alford and Carmack (1987).

Shore Ice Growth

As noted earlier, the freezing sequence can be characterized as a gradual closing in of shore ice forming a narrow channel along the core velocity, coupled with a progressive advance of the ice front due to the deposition of floes formed farther upstream. This is not to say that the two mechanisms are independent, for the narrower the channel the faster it will fill with drifting ice.

Osterkamp and Gosink (1983) point out that shore ice grows laterally by at least three mechanisms: conductive heat transfer through the ice, accumulation of drifting frazil, and loss of latent heat to supercooled river water. Figure 18 shows shore ice growth by frazil accumulation. Figure 19 shows the presence of dendritic features in the shore ice at a time when the surface heat loss is high and large amounts of frazil are present in the flow.

Because of the existence of the open lead near Marwell, it was convenient to measure the rate of growth of the shore ice coincident with reading of water level. These data (Fig. 20) suggest a strong relationship to air temperature. When plotted as a correlation diagram for the rate of shore ice growth in relation to air temperature (Fig. 21), a simple regression is obtained:

$$dW/dt = AT_a \text{ (in m/day)}$$

where dW/dt = lateral growth of shore ice

T_a = air temperature

A = curve-fitting coefficient applicable (only) to this reach of the river (A = -0.01 m/day °C).

Taking the mean temperature at Whitehorse to be about -20°C, one can estimate that shore ice grows at a rate of about 1 m every five days.

Fluctuations in water level also influence shore ice. Observations of shore ice formation were made and sketched to explain some of the reasons why shore ice can be thicker and possibly rougher than the central ice cover (Fig. 22). Other structural features in shore ice, related to shear and the deposition of frazil, are described by Osterkamp and Gosink (1983).

Ice Front Advance

The advance of the ice front through the reach is of prime engineering concern, for it is during this time that the Marwell region of Whitehorse is most prone to flooding.

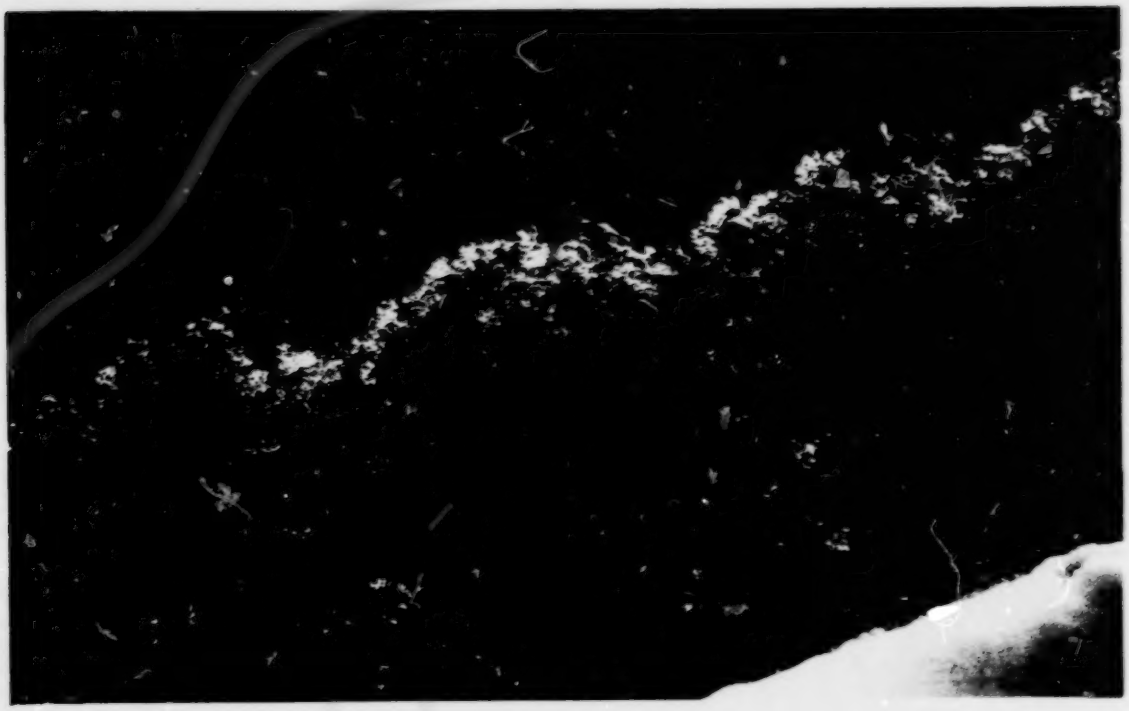


Figure 18. Shore ice showing diurnal frazil deposit.

Figure 19. Shore ice showing dendritic features along the edge.

Observations of ice front advance through the reach were made in both 1983/84 and 1984/85 (Fig. 23). From this map it appears that the ice front propagates very quickly from BM to X2, slows between X2 and X1, and moves very slowly above X1. Earlier we noted (Fig. 16) that the backwater effect increases as the ice front passes X2, suggesting that the sensitivity of flooding is related to the speed of ice front advance.

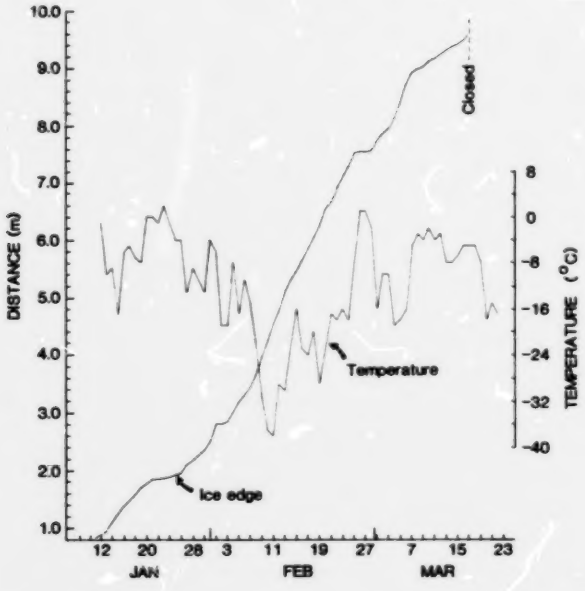


Figure 20. Air temperature and growth of shore ice at open section at M (January to March 1985).

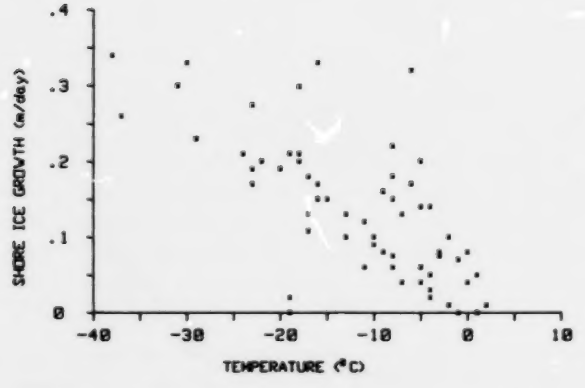


Figure 21. Shore ice growth rate in relation to air temperature.

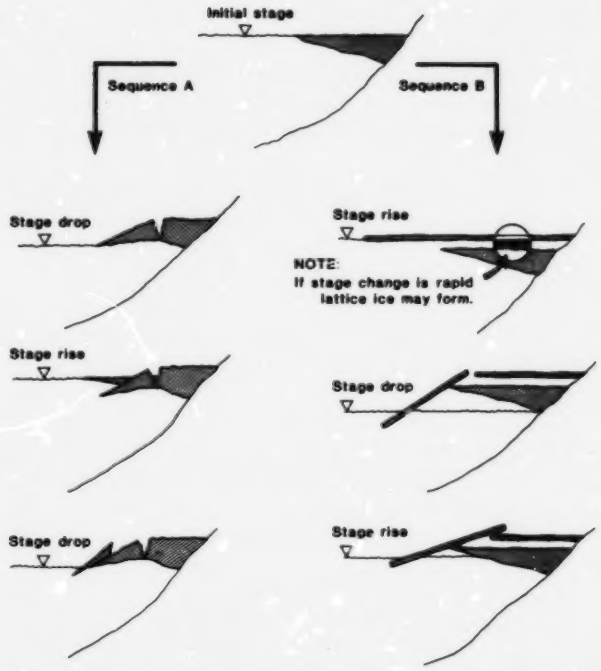


Figure 22. Schematic of structural changes in the growth of shore ice.

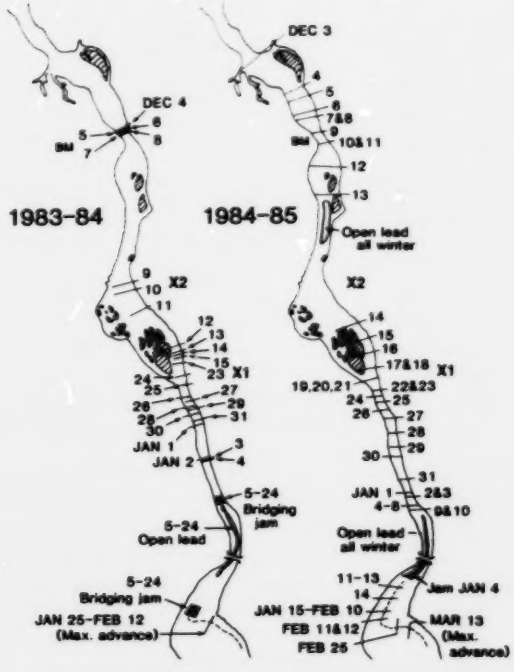


Figure 23. Ice front advance (1983/84 and 1984/85).

Velocity Distributions

Velocity is highly variable in both time and space. The observations described below illustrate how certain hydraulic conditions may alter vertical profiles of velocity.

The existence of an open lead at Marwell allowed us to examine the hydraulic conditions associated with the lead, and to obtain a rough understanding of frazil deposition downstream from the lead.

Vertical profiles of velocity downstream from the lead (Fig. 24) show the progressive establishment of the under-ice boundary layer. At a distance of 5 m from the end of open water the velocity profile is very much like that of an open water profile, with only the upper 0.1 m showing boundary layer development. At 20 m from the edge, however, the profile is much more regular and the boundary layer appears to be fully developed.

A longitudinal section downstream from the open lead (Fig. 25) shows frazil accumulations becoming evident about 8 to 10 m downstream from the open water. At this time the under-ice surface below the lead is quite smooth so that immediate deposition may not be favoured.

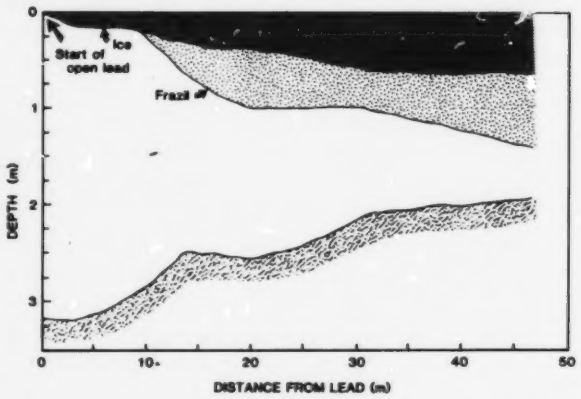


Figure 25. Frazil deposition behind lead.

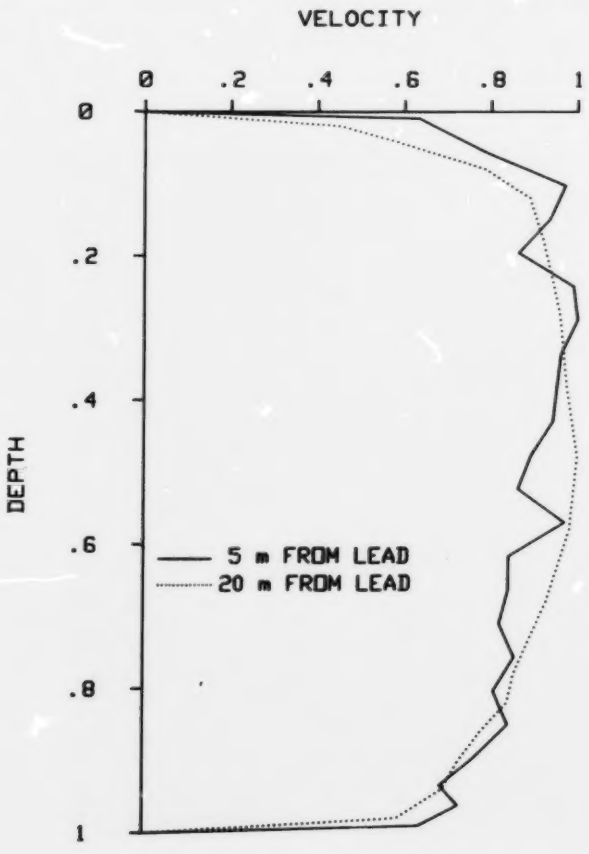


Figure 24. Velocity profiles behind lead.

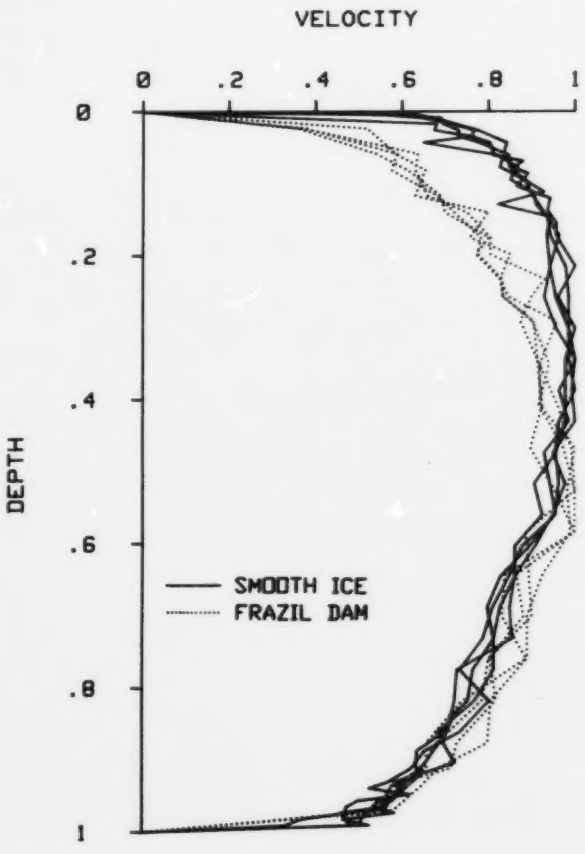


Figure 26. Velocity profiles below smooth ice and below frazil dam.

The presence of a frazil dam may also affect the shape of the velocity profile by presenting a different roughness to the flow. This is supported by the profiles shown in Figure 26 comparing flow under smooth ice with that under a frazil dam. In this case it appears that the friction velocity under the more irregular frazil dam is greater than that under the smooth, surface ice where no frazil is present.

Ice Ripple Formation

With the onset of spring, instabilities in the flow of warm (perhaps 0.02°C) water results in the formation of wavelike features, called ice ripples, at the ice/water interface (Carey, 1966; Ashton and Kennedy, 1972). The fluid mechanics of heat transfer at an ice/water interface in the presence of turbulent flow have been treated by Gilpin *et al.* (1980). Alford and Carmack (1987) noted that the hydraulic resistance of the reach appeared to increase coincident with the onset of ripple formation.

To examine the evolution of these features over a period of time, several ice sections were cut out, overturned, spray-painted, and photographed. Typically, these observations (shown here as made at M, 30 m from the left bank) reveal a dramatic change in the nature of the ice/water interface in a very short period of time. Initially, the bottom of the ice is featureless (Fig. 27). Then, as solar radiation begins to penetrate the cover and warm the underlying water, ripples begin to form (Fig. 28). At first the ripples are essentially straight-crested. As the amplitudes of the ripples grow, they extract more energy from the flow and the crests become strongly undulated (Fig. 29). In the final stages the crests of the ripples become discontinuous and broken (Fig. 30) and thus cannot be traced over distances much longer than the wavelength. By this time the amplitudes are in the order of 5 cm.

DISCUSSION

General Patterns

Table 4 summarizes a comparison of some of the features observed in the winters of 1983/84 and 1984/85. In general, the winter of 1984/85 was characterized by higher air temperatures and greater snowfall than the previous one. In the second year of study, the date of breakup was later. Also in the second year, the ice was thinner and a lead remained open at Marwell throughout winter.

Based on these two years of observation, some preliminary remarks about the freeze-up and breakup patterns of the Yukon River at Whitehorse can be made.

(1) Freeze-up jams and ice bridging can occur in the narrows at X4, near the depot, and immediately above the Robert Campbell Bridge.

(2) Ice front advance is most rapid between BM and X2.

(3) Highest water levels occur during the time the ice front advances between M and AM.

(4) Open leads may persist through winter at M and immediately below the bridge.

(5) Breakup, while increasing the hydraulic resistance of the reach, has little effect on water level.

Table 4. Summary Comparison of the Winters of 1983/84 and 1984/85

Event	Winter 1983/84	Winter 1984/85
Date of ice front at BM	Dec. 4	Dec. 9
Date of ice front at M	Dec. 9	Dec. 13
Date of ice front at AM (defined as freeze-up)	Jan. 2	Dec. 29
Maximum ice thickness at M	1.0 m	0.7 m
Date of maximum ice thickness at M	Feb. 7	Mar. 19
Maximum percentage-area of frazil dam at M	41.6%	39.8%
Date of maximum percentage-area of frazil dam at M	Dec. 14	Feb. 12
Maximum water level at M	3.501 m	3.471 m
Date of maximum water level at M	Dec. 9	Dec. 16
Maximum water level at AM	4.812 m	5.085 m
Date of maximum water level at AM	Jan. 1	Dec. 30
Date of ice clear at White Pass Station	Mar. 22	Apr. 8
Date of ice clear at AM	Mar. 23	Apr. 8
Date of ice clear at M	Mar. 25	Apr. 10
Date of ice clear at BM (defined as breakup)	Mar. 29	Apr. 12
Snowfall from Nov. 1 to Mar. 31*	0.724 m	1.672 m

*Recorded by the Atmospheric Environment Service at Whitehorse.

Frazil Dam Formation

Our observations to date suggest that stream geometry influences frazil deposition so that frazil dams will form at the same location each year and will likely exhibit the same cross-sectional profile and area from year to year. Dams appear to grow in size until the cover stabilizes (immediately after freeze-up) and then gradually erode to breakup.

The composition of slush changes constantly through the season. It may appear as fine spicules and discs initially,

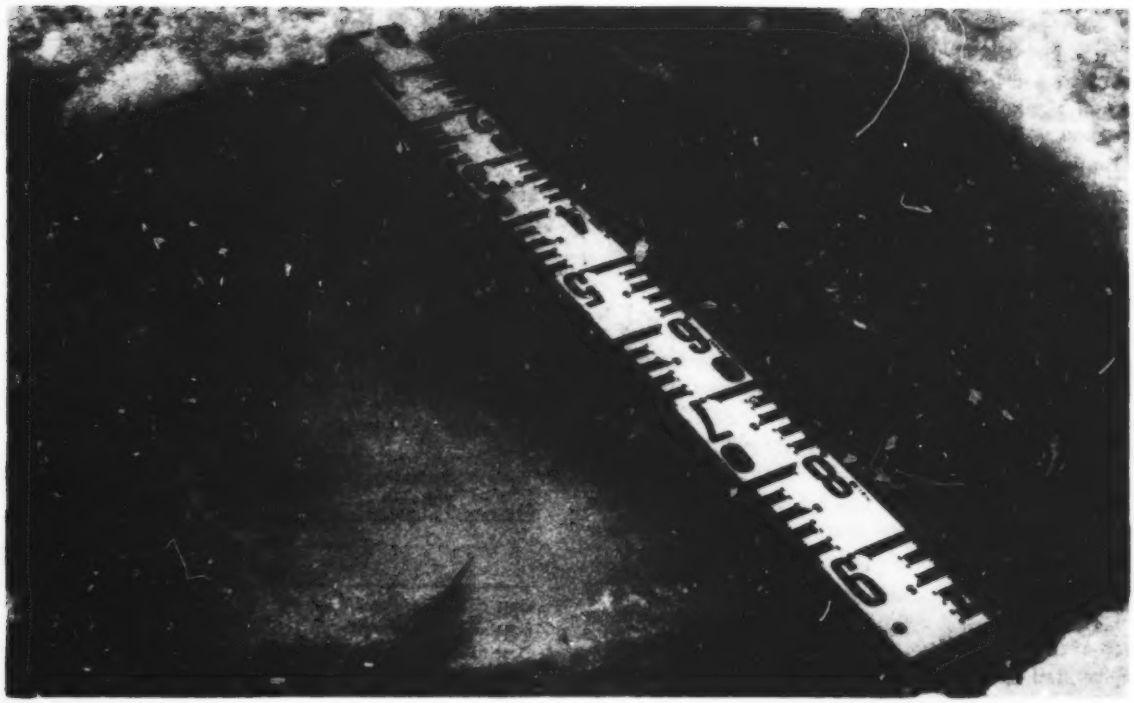


Figure 27. Bottom of ice showing no features (March 13, 1985).

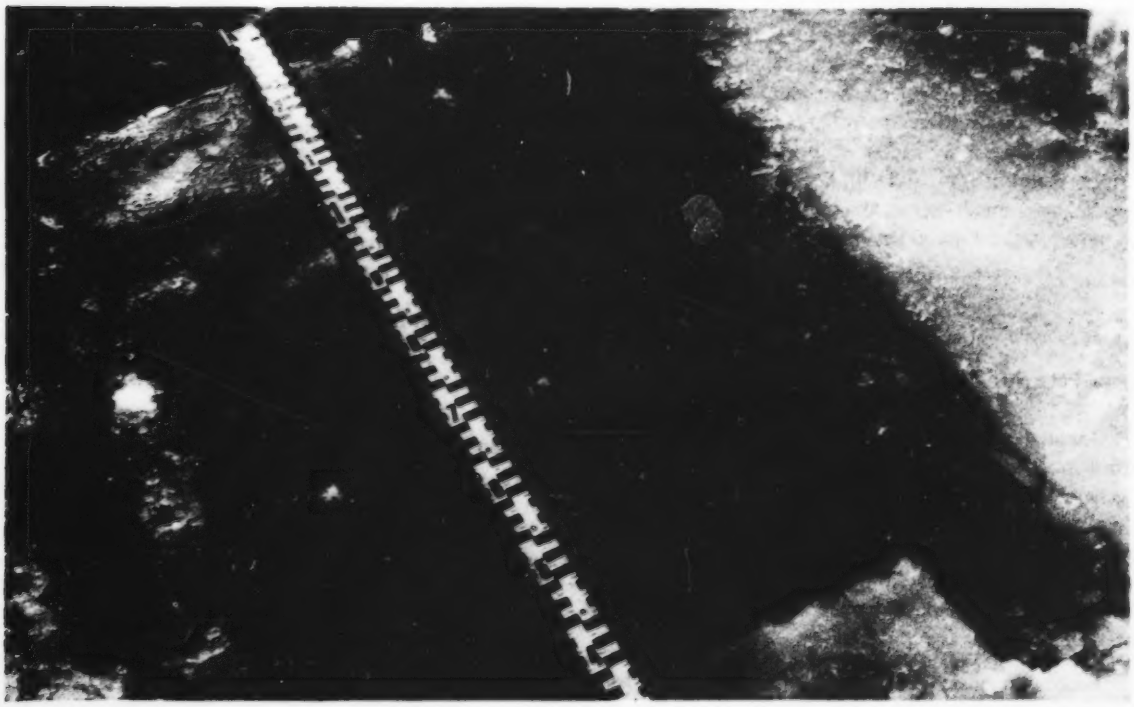


Figure 28. Ripples beginning to form (March 28, 1985).

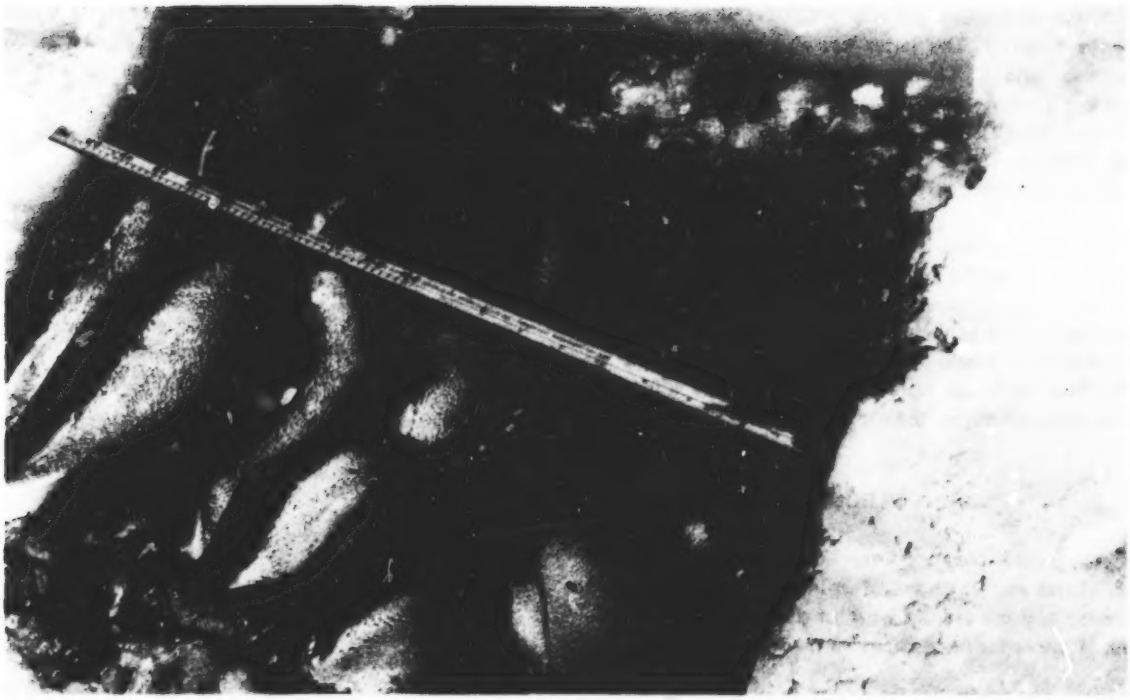


Figure 29. Crests becoming strongly undulated (April 2, 1985).

Figure 30. Crests becoming discontinuous and broken (April 8, 1985).

but change to nodules the size and shape of seagulls' eggs prior to breakup. The latter has also been reported by D. Lawson and E. Chacho (1985, U.S. Army, Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory; pers. com.). Also, there is vertical structure in frazil dams, with the slush having a maximum hardness about 1 m below the ice/slush interface.

Finally, we note there are two possible types of frazil deposition during the freeze-up period. First, lateral deposition, which occurs under shore ice; and second, medial deposition, which occurs under the last part of the section to freeze over, where the velocity is highest and the ice is roughest. It is the latter that may strongly affect the conveyance capacity of the channel.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to acknowledge the enthusiastic help of E. Marles and V. Chamberlain in the cold work of data collection and the tedious work of data reduction. We also thank M. Jarvis for her assistance in reading water levels.

Drafting and illustrating were ably done by B. Gordon of Gordon Enterprises, Vancouver.

Finally, we are grateful to the staff at the Whitehorse Rapids hydro site for providing streamflow data, and to Arctic Diamond Drilling Inc. in Marwell for allowing us daily passage through its property.

REFERENCES

Alford, M.E., and E.C. Carmack. 1987. Observations on ice cover and streamflow in the Yukon River near Whitehorse during 1983/84. NHRI Pap. No. 32, Sci. Ser. No. 152, National Hydrology Research Institute, Inland Waters/Lands Directorate, Environment Canada, Saskatoon, Sask.

Ashton, G.D., and J.F. Kennedy. 1972. Ripples on the underside of river ice covers. J. Hydraul. Eng., 98: 1603–24.

Carey, K.L. 1966. Observed configuration and computed roughness of the underside of river ice, St. Croix River, Wisconsin. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 550-B: 192–98.

Gilpin, R.R., T. Hirrata, and K.C. Cheng. 1980. Wave formation and heat transfer at an ice-water interface in the presence of a turbulent flow. J. Fluid Mech., 99: 619–40.

Martin, S. 1981. Frazil ice in rivers and oceans. Annu. Rev. Fluid Mech., 13: 379–97.

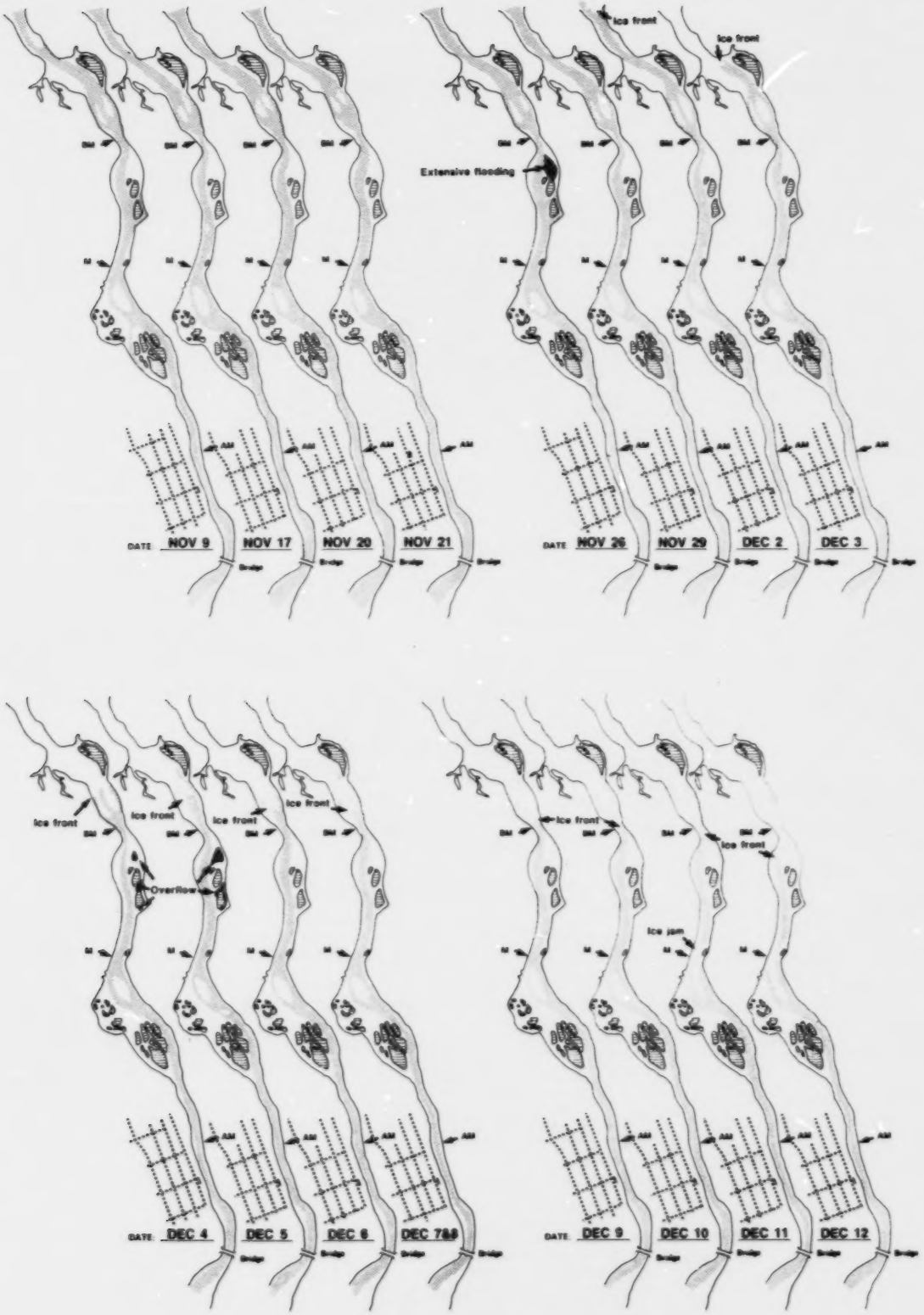
Osterkamp, T.E. 1978. Frazil ice formation: a review. J. Hydraul. Eng., 104: 1239–55.

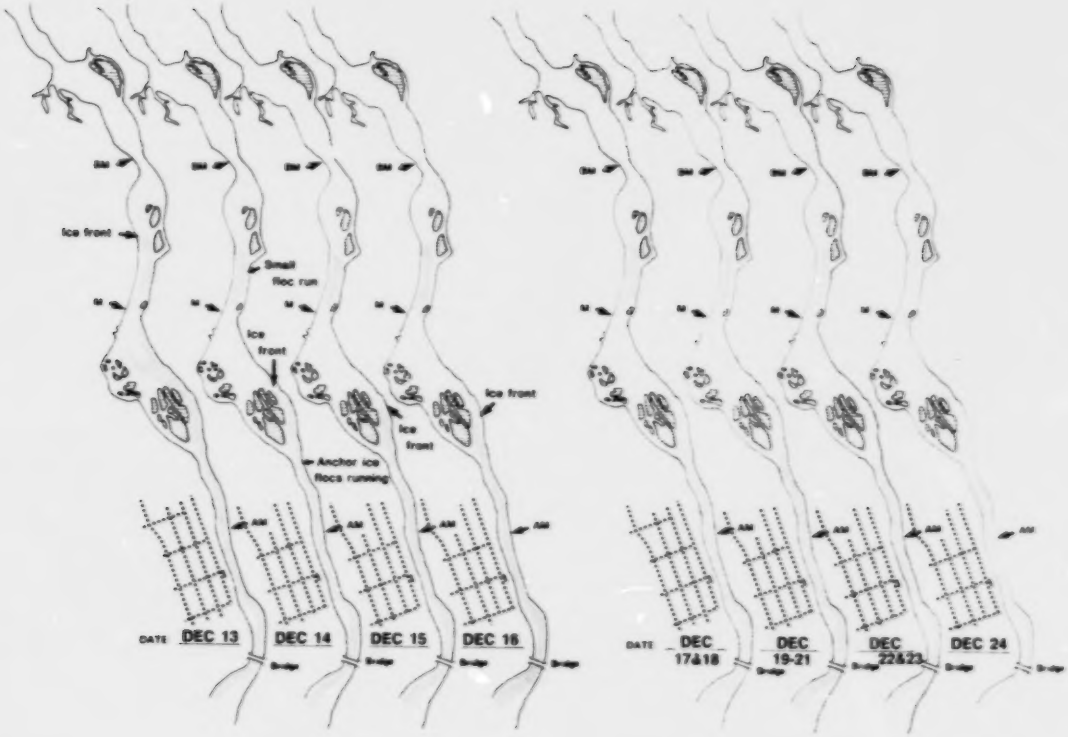
Osterkamp, T.E., and J.P. Gosink. 1983. Frazil ice formation and ice cover development in interior Alaska streams. Cold Reg. Sci. Technol., 8: 43–56.

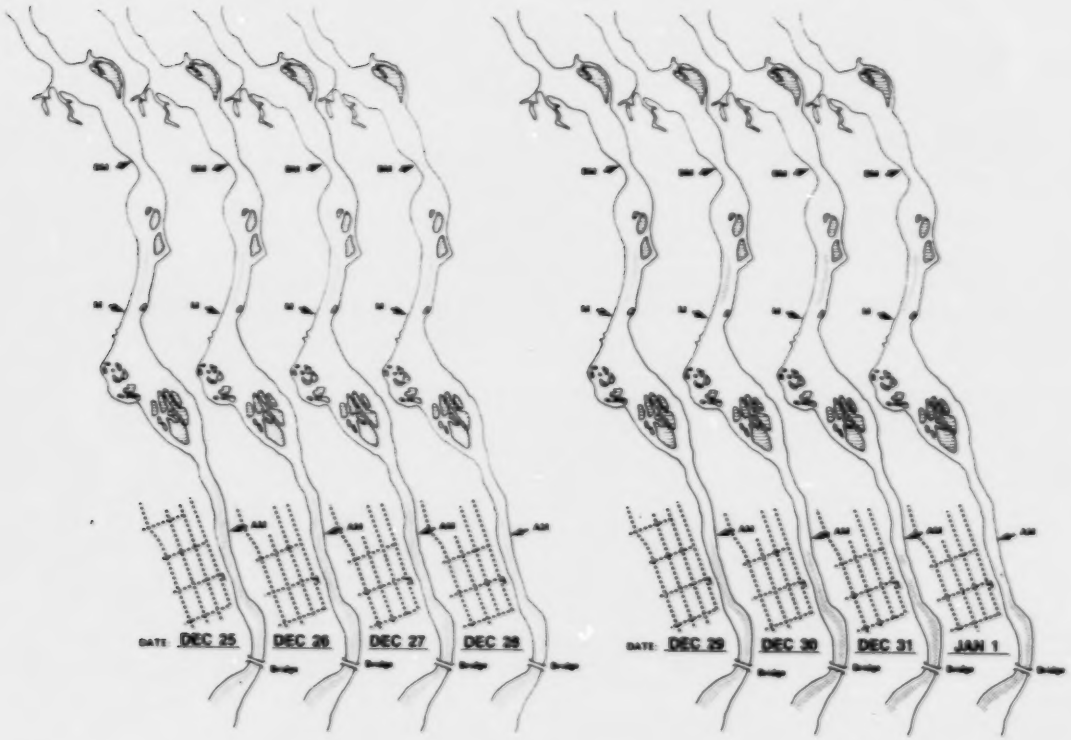
Tsang, G. 1982. Frazil and Anchor Ice. National Research Council Subcommittee on Hydraulics of Ice Covered Rivers, Ottawa, Ont.

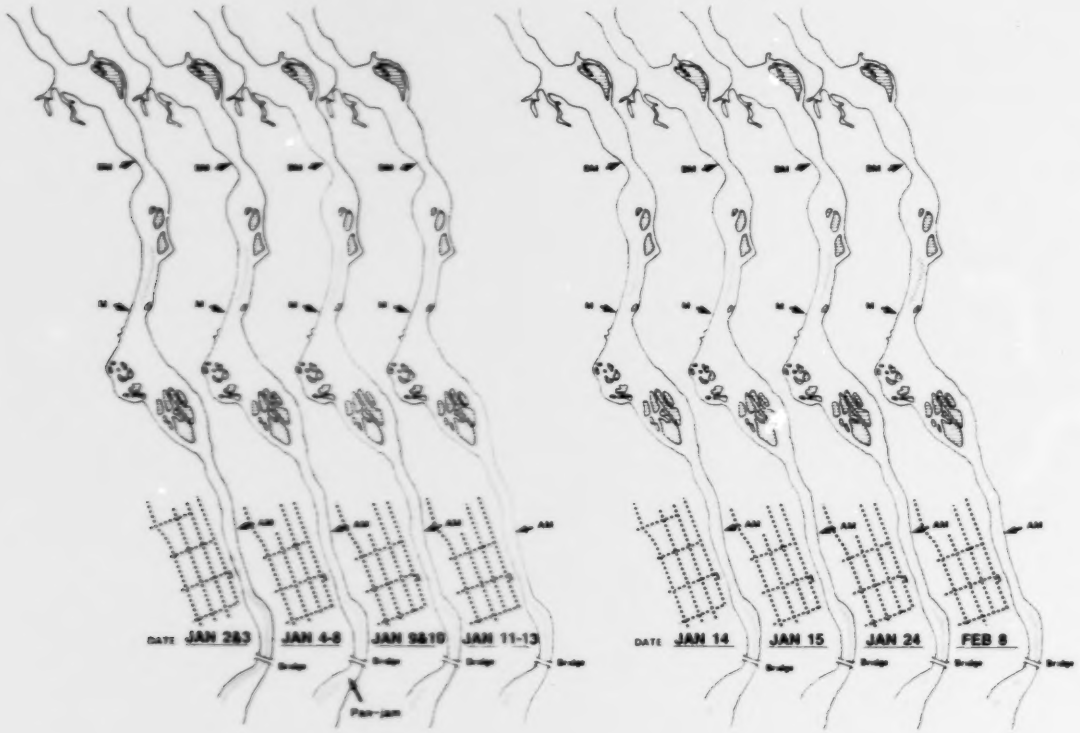
Appendix

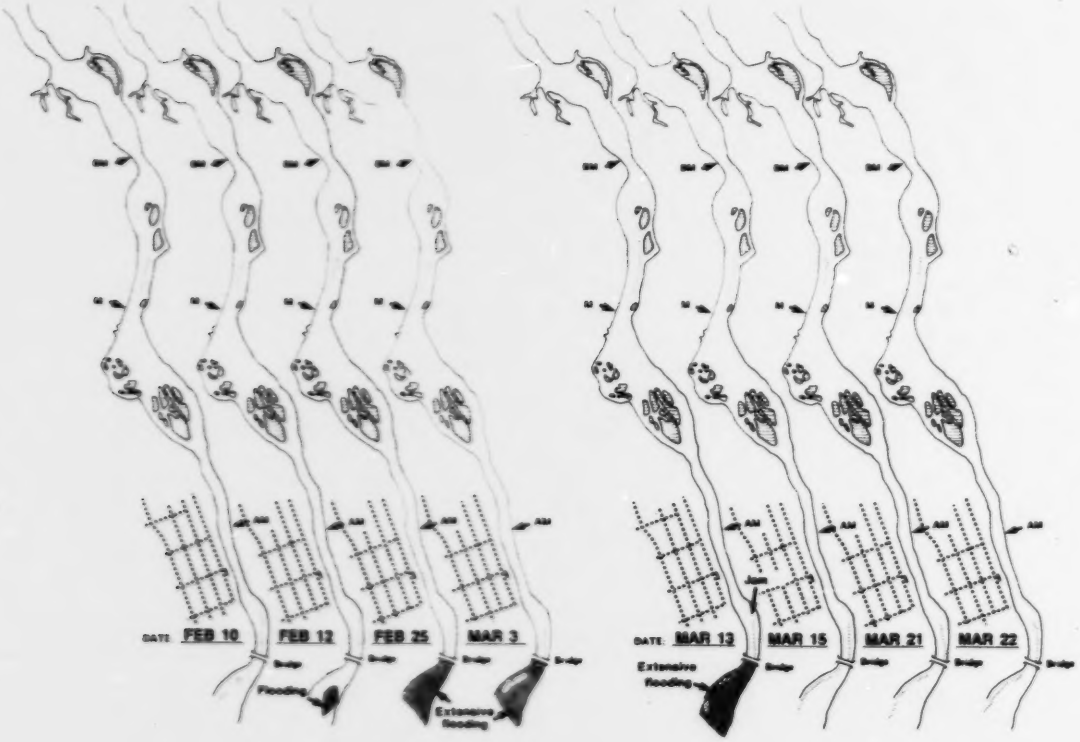
Maps Illustrating the Advance and Retreat of the Seasonal Ice Cover During 1984/85

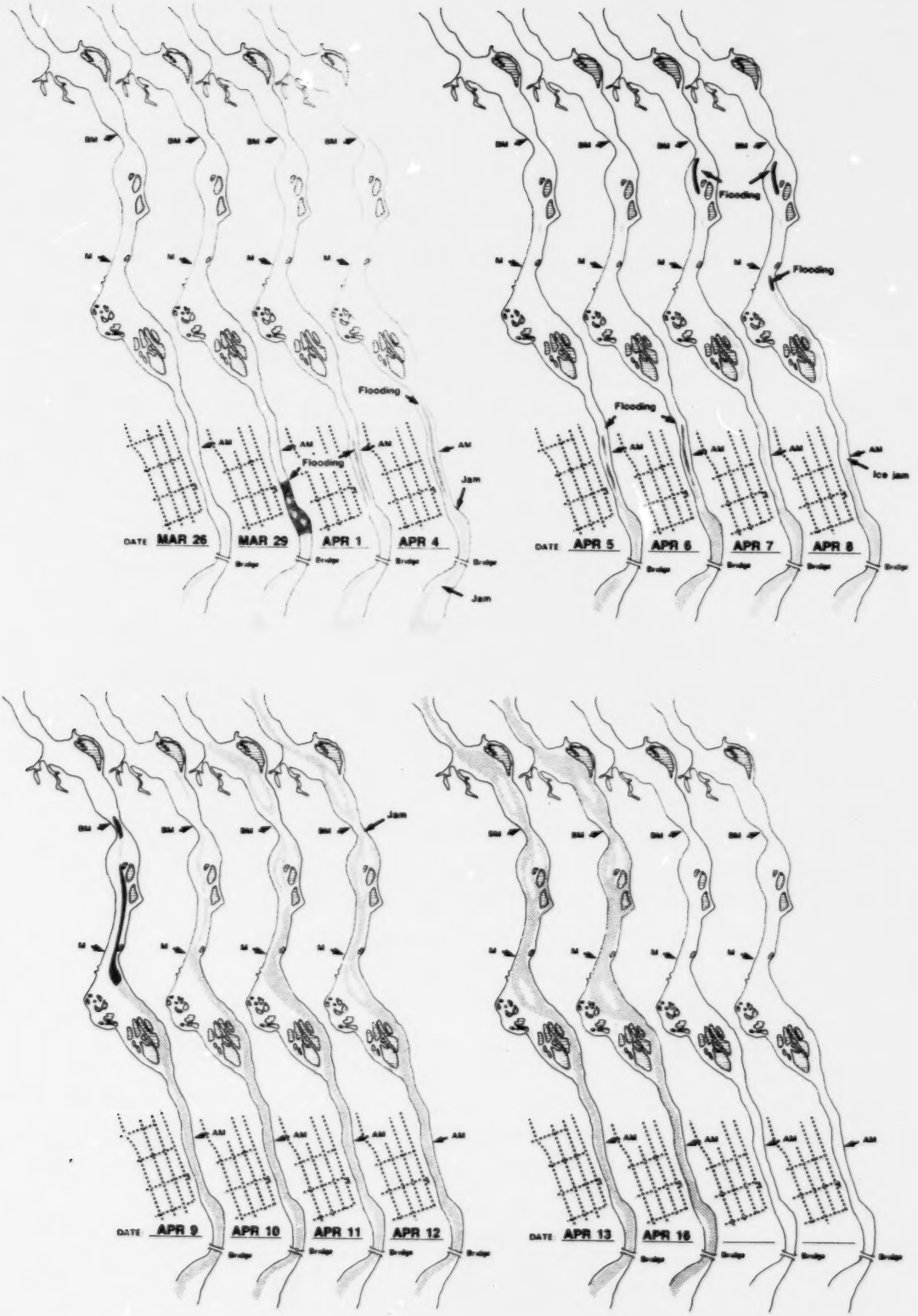

Ice front
Ice front
Extensive flooding
DATE NOV 9
NOV 17
NOV 20
NOV 21
DATE NOV 26
NOV 29
DEC 2
DEC 3
Ice front
Ice front
Ice front
Ice front
Overflow
DATE DEC 4
DEC 5
DEC 6
DEC 7&8
Ice front
Ice front
Ice jam
DATE DEC 9
DEC 10
DEC 11
DEC 12


Ice front
Small floc run
Ice front
Ice front
Ice front
Anchor ice flocs running
DATE DEC 13
DEC 14
DEC 15
DEC 16
DATE DEC 17&18
DEC 19-21
DEC 22&23
DEC 24


DATE DEC 25
DEC 26
DEC 27
DEC 28
DATE DEC 29
DEC 30
DEC 31
JAN 1


DATE JAN 2&3
JAN 4-8
JAN 9&10
JAN 11-13
Bridge
Ice jam
DATE JAN 14
JAN 15
JAN 24
FEB 8


DATE FEB 10
FEB 12
FEB 25
MAR 3
Bridge
Flooding
Extensive flooding
DATE MAR 13
MAR 15
MAR 21
MAR 22
Jam
Extensive flooding


DATE
MAR 26
MAR 29
APR 1
APR 4
APR 5
APR 6
APR 7
APR 8
APR 9
APR 10
APR 11
APR 12
APR 13
APR 16
Flooding
Jam
Ice Jam
AM
Bridge

Environnement Canada Environment Canada

Institut national de recherche en hydrologie

RAPPORT N° 34 DE L'INRH

ÉTUDE N° 155, SÉRIE SCIENTIFIQUE DE LA DGEI

Observations sur le manteau glaciel et le débit du fleuve Yukon près de Whitehorse en 1984-1985

M.E. Alford* et E.C. Carmack†

*Anciennement à :
Division des relevés hydrologiques du Canada
Direction des ressources en eau
Direction générale des eaux intérieures
Région du Pacifique et du Yukon
Whitehorse (Yukon)

Adresse actuelle :
Yukon Expeditions
127 Alsek
Whitehorse (Yukon)

†Direction générale des eaux intérieures
Institut national de recherche en hydrologie
Centre national de recherche en hydrologie
Saskatoon (Saskatchewan)

Adresse actuelle :
Pêches et Océans Canada
Institut des sciences océaniques
9860 West Saanich Road
Sidney (Colombie-Britannique)

INRH

DIRECTION GÉNÉRALE DES EAUX INTÉRIEURES ET DES TERRES
INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE
CENTRE NATIONAL DE RECHERCHE EN HYDROLOGIE
SASKATOON (SASKATCHEWAN) 1987
(Available in English on request)

Publié avec l'autorisation
du ministre de l'Environnement

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1987
N° de cat. En36-502/155F
ISBN 0-662-94475-5

Table des matières

	Page
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	v
INTRODUCTION	1
Objectifs	1
Zone de l'étude	1
Mesures	2
OBSERVATION ET COMPARAISONS	2
Météorologie et hydrologie	2
Distribution de la couche de glace	3
Caractéristiques des barrages de frasil	5
Conditions hydrauliques	6
OBSERVATIONS DE PROCESSUS SPÉCIFIQUES	11
Changement de la température de l'eau au cours de la prise des glaces	11
Croissance de la glace de rive	11
Avance du front de glace	13
Distribution de la vitesse	14
Formation des rides à la surface de la glace	15
DISCUSSION	15
Orientations générales	15
Formation de barrages de frasil	18
REMERCIEMENTS	18
RÉFÉRENCES	18
ANNEXE. Cartes illustrant l'avance et le recul du manteau glaciel saisonnier en 1984-1985	21

Tableaux

1. Surface de la couverture de glace	4
2. Volume et épaisseur de la glace	5
3. Valeurs quotidiennes du débit, du niveau de l'eau et de la pente de la ligne d'eau pendant l'hiver 1984-1985	7
4. Comparaison sommaire des hivers 1983-1984 et 1984-1985	18

Illustrations

Page

Figure 1. Zone de l'étude montrant l'emplacement des stations 1
Figure 2. Températures de l'air (1983–1984 et 1984–1985) 2
Figure 3. Pressions barométriques (1983-1984 et 1984-1985) 2
Figure 4. Débit (1983-1984 et 1984-1985). 3
Figure 5. Période de gel observée en 1984-1985. 3
Figure 6. Période de la débâcle, observée en 1984-1985. 3
Figure 7. Surface de la couverture de glace, X4 à SG (novembre 1984 à avril 1985) 5
Figure 8. Épaisseur et volume de la glace (novembre 1984 à avril 1985) 5
Figure 9. Profils du barrage de frasil en M (février à avril 1985) 6
Figure 10. Section transversale du barrage de frasil en M (janvier à avril 1985) 6
Figure 11. Schéma du dépôt du barrage de frasil (1984-1985) 6
Figure 12. Profils verticaux de la dureté du barrage de frasil 6
Figure 13. Niveaux de l'eau (octobre 1984 à mai 1985). 7
Figure 14. Pentes de la ligne d'eau (octobre 1984 à avril 1985) 7
Figure 15. Hauteurs par rapport à l'échelle en AM, M, et BM à des intervalles de temps donnés 7
Figure 16. Niveau de l'eau en AM par rapport à la position du front de glace 11
Figure 17. Gradients de la température de l'eau avant la prise des glaces 11
Figure 18. Dépôt diurne du frasil sur la glace de rive 12
Figure 19. Présence d'éléments dendritiques le long de l'extrémité de la glace de rive 12
Figure 20. Température de l'air et croissance de la glace de rive en une section à surface libre en M (janvier à mars 1985). 13
Figure 21. Taux de croissance de la glace de rive en fonction de la température de l'air 13
Figure 22. Schéma des changements structuraux dans la croissance de la glace de rive 13
Figure 23. Avance du front de glace (1983-1984 et 1984-1985). 14
Figure 24. Profils de la vitesse derrière le chenal libre de glace. 14
Figure 25. Formation d'un dépôt de frasil derrière le chenal libre de glace. 14
Figure 26. Profils de la vitesse au-dessous de la glace lisse et au-dessous du barrage de frasil 15
Figure 27. Surface de la glace ne montrant aucune marque (13 mars 1985) 16
Figure 28. Rides commençant à se former (28 mars 1985) 16
Figure 29. Crêtes devenant fortement ondulées (2 avril 1985). 17
Figure 30. Crêtes devenant interrompues et brisées (8 avril 1985) 17

Résumé

L'objectif de l'Expérience de saisonnalité glacielle du Yukon (ESAGY) est de comprendre les processus physiques qui influent sur la couche de glace à la surface de l'ensemble des lacs et des rivières du Nord. Pour réaliser cet objectif, on a commencé à faire des études de l'hydrologie et du régime des glaces le long d'un bief de 4.3 km du fleuve Yukon à Whitehorse au cours de l'hiver 1983-1984.

Ce rapport porte principalement sur les observations de la seconde année d'étude (1984-1985) du bief de Whitehorse. Nous analysons les différences de l'évolution de la couche de glace (par exemple, régimes de gel, progression des fronts de glace, croissance de barrages de frasil et formation de glaces ondulées). Les différents régimes climatiques et les effets des conditions spécifiques de la glace (par exemple, chenaux non gelés, fronts de glace, ondulations de glace) sur la répartition de l'écoulement sont la cause de ce phénomène. On présente une comparaison sommaire des observations du premier hiver au second.

Abstract

The objective of the Yukon Ice Seasonality Experiment (YISEX) is to obtain an understanding of physical processes affecting ice cover on northern lake and river systems. Towards this goal, observations of the hydrology and ice regime along a 4.3-km reach of the Yukon River at Whitehorse were initiated during the winter of 1983/84.

A report is given here of the second year (1984/85) of measurements obtained at the Whitehorse reach. Differences in ice cover evolution (e.g., freeze-up patterns, ice front advance, frazil dam growth, and ripple development) caused by different weather patterns and the effects of specific ice conditions (e.g., core leads, ice fronts, and ice ripples) on the distribution of velocity are discussed. A summary comparison of the two winters is presented.

Observations sur le manteau glaciel et le débit du fleuve Yukon près de Whitehorse en 1984-1985

M.E. Alford et E.C. Carmack

INTRODUCTION

Objectifs

Le but global de l'Expérience de saisonnalité glacielle du Yukon (ESAGY) est d'obtenir un aperçu des processus qui influent sur le manteau glaciel saisonnier des rivières et des lacs du bassin du fleuve Yukon. Pour ce faire, on a effectué une étude du régime des glaces et de l'hydrologie le long d'un tronçon de 4.3 km du fleuve Yukon, près de Whitehorse, au cours de l'hiver 1983-1984 (voir Alford et Carmack, 1987). Ce programme a été prolongé sur une deuxième année avec comme objectif d'obtenir une comparaison des caractéristiques hydrauliques et des caractéristiques de la glace dans des situations météorologiques diverses.

Dans ce rapport, nous comparons les conditions ambiantes observées en 1983-1984 à celles de 1984-1985, puis nous portons une attention particulière à certains processus qui semblent avoir un effet important sur le cycle glaciel saisonnier. Comme l'hiver de 1984-1985 a été relativement doux, mais avec des chutes de neige plus fortes que la moyenne, les effets de telles conditions météorologiques sur la formation de la glace peuvent être comparés à ceux que l'on a observés l'hiver précédent, particulièrement en ce qui a trait aux points suivants :

1) le processus et la structure de la prise des glaces, y compris les facteurs qui régissent la croissance de la glace de rive;

2) les vitesses de croissance et de décroissance des barrages de frasil, entre autres des changements dans leurs propriétés physiques;

3) les effets de la formation de la glace et de l'avance du front de glace sur le niveau de l'eau, la résistance à l'écoulement et le profil vertical de la vitesse de l'eau;

4) le processus et la structure de la débâcle, y compris la formation de rides à la surface de contact eau-glace.

Zone de l'étude

Le tronçon du fleuve Yukon choisi pour l'étude s'étend du pont Robert Campbell, dans le secteur sud de Whitehorse, jusqu'à l'étranglement qui se trouve à 4.3 km en aval (figure 1). À cet endroit, le fleuve draine une superficie d'environ 19 400 km^2 et a un débit annuel de 240 $m^3 s^{-1}$. Sur ce tronçon, le fleuve a une pente moyenne de 0.5×10^{-3}.

Figure 1. Zone de l'étude montrant l'emplacement des stations.

Le cours du Yukon a été modifié par la construction de deux barrages amont. Le premier, en aval de l'effluent du lac Marsh, assure une retenue amont. Le second, aux

rapides Whitehorse, est une centrale hydroélectrique. Actuellement le débit à Whitehorse est régularisé par le barrage aval et il est soumis à des contraintes liées à la structure comme aux prescriptions de la loi. En fait, le niveau de l'eau derrière le barrage (lac Schwatka) ne peut monter à plus de 653.34 m ou descendre à moins de 652.27 m.

Mesures

Le niveau de l'eau a été enregistré quotidiennement à quatre stations pendant la prise des glaces, puis à trois stations pendant tout l'hiver. Les trois postes de mesure ont été les mêmes que pendant le programme de 1983-1984 (AM, M, et BM), tandis que le quatrième se trouvait en X4. À chaque poste et à divers moments de l'hiver, on a mesuré l'épaisseur et la surface de la glace, l'accumulation de frasil, la dureté du frasil et la vitesse d'écoulement de l'eau. Pour minimiser les difficultés d'échantillonnage qu'on associe aux variations diurnes du niveau de l'eau, toutes les mesures ont été prises à peu près à la même heure du jour. Les techniques de mesure sont données en détail dans Alford et Carmack (1987).

On a obtenu le débit quotidien à partir de l'enregistrement de la quantité totale d'eau qui franchissait le site hydro-électrique des rapides de Whitehorse (qu'on nomme aussi «station génératrice» ou SG).

Avant l'arrivée du gel, les températures de l'eau ont été obtenues à des sites choisis qui vont de la station génératrice jusqu'à BM. On a utilisé un thermomètre à mercure à échelle prolongée dont la précision est à ±0.1 °C près.

La température de l'air et la pression barométrique ont été enregistrées à la résidence de l'auteur Alford, à Riverdale, qui se trouve à environ 1 km du tronçon étudié, et à environ 10 m au-dessus du niveau du fleuve. Nous faisons aussi remarquer que les observations météorologiques normales, dont la température de l'air, la pression barométrique, l'humidité, la vitesse du vent et le rayonnement à ondes courtes, ont été enregistrées à l'aéroport de Whitehorse, aussi à environ 1 km du fleuve, mais à 61 m au-dessus de son niveau. Bien que ces données ne soient pas jointes au rapport, on peut les obtenir du Service de l'environnement atmosphérique.

On a essayé, autant que possible, de photographier les caractéristiques structurales de la glace. Ainsi, pour obtenir plus de renseignements sur les changements physiques qui se produisent à la surface inférieure de la glace, on a coupé plusieurs blocs de glace à l'aide d'une scie à glace suédoise; on a renversé ces blocs, on en a peint la surface inférieure avec de la peinture noire en aérosol, puis on les a photographiés.

OBSERVATION ET COMPARAISONS

Météorologie et hydrologie

On trouve, aux figures 2 et 3 respectivement, une comparaison entre les températures de l'air et les pressions barométriques des deux années de l'étude. Les deux hivers ont été plus doux qu'à la normale; cependant, l'hiver 1984-1985 a été bien plus chaud que l'hiver précédent.

Une autre différence importante dans les conditions météorologiques est que les chutes de neige ont été plus fortes que la moyenne durant l'hiver 1984-1985, surtout pendant les mois critiques de la prise des glaces. Ce point est important, puisque la neige agit comme isolant, et ralentit généralement la croissance de la glace.

On donne une comparaison (figure 4) entre les débits des deux années d'étude. On y relève deux différences : pendant l'hiver 1984-1985, le débit a été à la fois plus fort (10 % environ) et plus fluctuant que l'année précédente. Comme le débit peut être réglé, dans les limites restreintes, par le barrage des rapides de Whitehorse, toute modification apportée pour effectuer l'entretien des turbines, la régulation

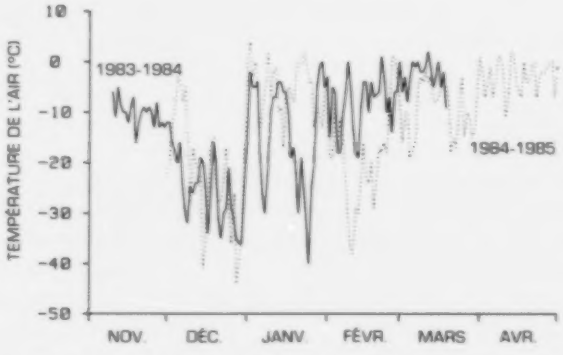


Figure 2. Températures de l'air (1983–1984 et 1984–1985).

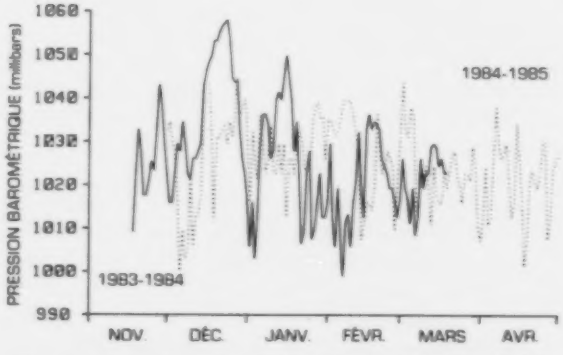


Figure 3. Pressions barométriques (1983–1984 et 1984–1985).

Figure 4. Débit (1983–1984 et 1984–1985).

de leur régime ou le passage d'une turbine à une autre, peut entraîner de courtes fluctuations du débit du barrage. Au cours de l'année 1984–1985, on a ajouté une quatrième roue dans le circuit pour permettre l'entretien des turbines plus anciennes; les fluctuations observées sont probablement reliées à la mise en service de cette turbine.

Distribution de la couche de glace

La période de prise des glaces observée en 1984–1985 est résumée à la figure 5 (voir aussi l'annexe). La glace de rive a commencé à se former dans les chenaux secondaires du fleuve au début de novembre. Le 9 novembre, cette glace de rive se retrouvait presque partout à l'intérieur du tronçon étudié.

Le reste de la prise des glaces se caractérisait par la combinaison de l'élargissement de la bande de glace de rive pour former un étroit chenal le long du noyau de vitesse, et par l'avance d'un front de glace provoqué par l'accumulation de flocons, de floes et de morceaux de frasil formés en amont. Le 11 décembre, le front de glace a passé BM, et il s'est formé un embâcle au milieu du chenal en M. Le 14 décembre, le front principal avait atteint un point qui se situait entre X2 et X1. Cependant, il restait, près de M, une vaste surface d'eau libre de glace. Le 29 décembre, le front de glace était passé en amont de AM. Par prise des glaces dans ce tronçon on entend le temps de progression du front de glace jusqu'à AM. En 1983–1984, l'avance du front de glace jusqu'à AM s'est produite le 2 janvier, à peu près au même moment qu'en 1984–1985.

Le couche de glace a atteint son maximum entre le 12 février et le 13 mars. Le chenal libre de glace, près de M, est demeuré libre de glace une grande partie de l'hiver pour ne geler que le 12 février. Une autre partie du chenal, juste en amont du pont Robert Campbell, est restée libre de glace tout au long de l'hiver. Cette situation s'est

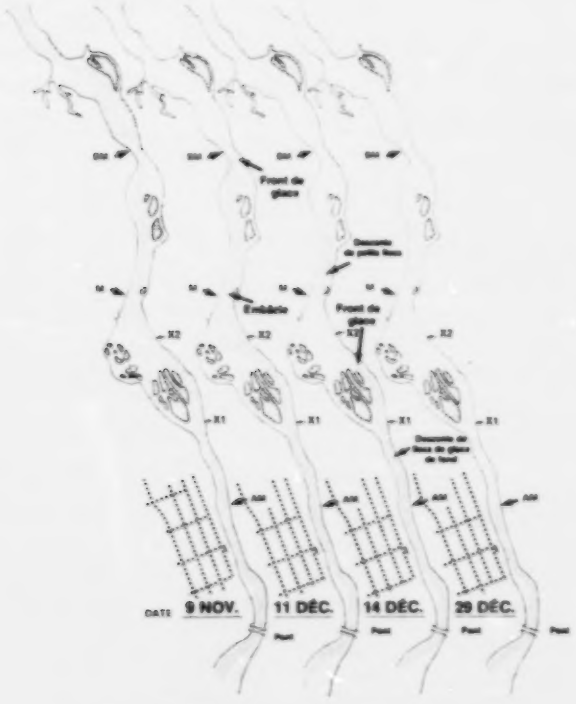


Figure 5. Période de gel observée en 1984–1985.

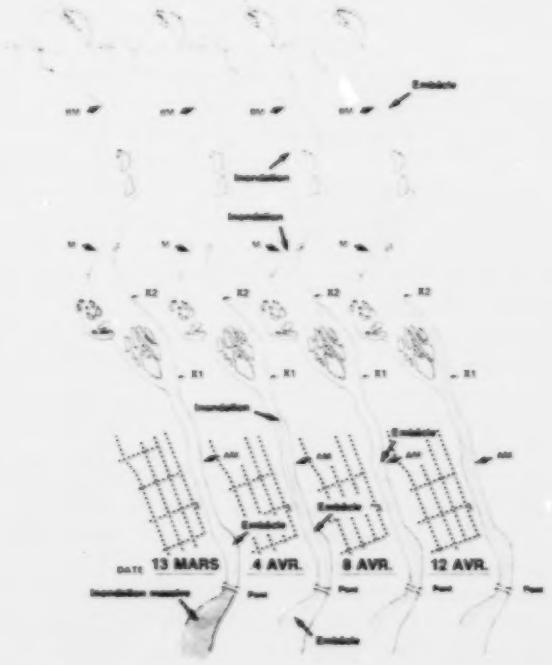


Figure 6. Période de la débâcle, observée en 1984–1985.

produite fréquemment puisque la pile du pont a provoqué la formation d'un embâcle de glace juste en amont du pont. La couche de glace s'étend invariablement jusqu'au premier coude en amont du pont, mais pas plus loin.

L'état de la couche de glace au milieu de l'hiver et au cours du printemps est donné à la figure 6 (voir aussi l'annexe). Les premiers signes de la débâcle, à la fin de mars et au début d'avril, furent, entre autres, l'apparition de petites mares d'eau sur la glace et l'accumulation de morceaux de glace brisée en forme de poêlon, dans les embâcles. Le 8 avril, d'importants chenaux d'eau plus chaude avaient fait leur apparition le long du tronçon étudié. Le 12 avril, le tronçon était virtuellement libre de glace, à l'exception d'un embâcle mineur en BM, et il ne restait que la glace de rive ou de la glace échouée. Par débâcle on entend la période de temps pendant laquelle le tronçon est resté ouvert jusqu'à BM. En 1983-1984, le tronçon était ouvert le 29 mars, à peu près deux semaines plus tôt qu'en 1984-1985.

Les valeurs quotidiennes de la surface de la couche de glace ont été calculées à partir des cartes données à l'annexe et sont énumérées au tableau 1. La courbe correspondante de la croissance de la couche de glace entre X4 et SG (figure 7) montre un accroissement rapide de la couche au début, suivi d'un accroissement beaucoup plus lent par la suite. On avait observé le même phénomène en 1984-1985.

Tableau 1. Surface de la couverture de glace

Date	X4 à SG		AM à M	
	(km^2)	(%)	(km^2)	(%)
84-11-09	0.8542	51.0	0.2857	63.9
84-11-17	0.8987	53.6	0.2889	64.6
84-11-20	0.9255	55.2	0.2944	65.8
84-11-21	0.9326	55.6	0.2944	65.8
84-11-26	0.9554	57.0	0.2970	66.4
84-11-29	0.9862	58.8	0.2983	66.7
84-12-02	0.9989	59.6	0.3049	68.2
84-12-03	1.0215	61.0	0.3096	69.2
84-12-04	1.0289	61.4	0.3128	69.9
84-12-05	1.0568	63.1	0.3148	70.4
84-12-06	1.0575	63.1	0.3154	70.5
84-12-07	1.0920	65.2	0.3170	70.9
84-12-08	1.0920	65.2	0.3170	70.9
84-12-09	1.1388	68.0	0.3185	71.2
84-12-10	1.1408	68.1	0.3237	72.4
84-12-11	1.1414	68.1	0.3284	73.4
84-12-12	1.1440	68.3	0.3289	73.5
84-12-13	1.1472	68.5	0.3318	74.2
84-12-14	1.2159	72.6	0.3849	86.0
84-12-15	1.2192	72.8	0.4018	89.8

Tableau 1 (suite)

Date	X4 à SG		AM à M	
	(km^2)	(%)	(km^2)	(%)
84-12-16	1.2298	73.4	0.4026	90.0
84-12-17	1.2387	73.9	0.4051	90.5
84-12-18	1.2387	73.9	0.4051	90.5
84-12-19	1.2684	75.5	0.4195	93.8
84-12-20	1.2648	75.5	0.4195	93.8
84-12-21	1.2648	75.5	0.4195	93.8
84-12-22	1.2769	76.2	0.4259	95.2
84-12-23	1.2769	76.2	0.4259	95.2
84-12-24	1.2801	76.4	0.4305	96.2
84-12-25	1.2960	77.3	0.4336	96.9
84-12-26	1.2982	77.5	0.4341	97.0
84-12-27	1.3018	77.7	0.4380	97.9
84-12-28	1.3057	77.9	0.4387	98.1
84-12-29	1.3060	77.9	0.4410	99.3
84-12-30	1.3224	78.9	0.4457	99.6
84-12-31	1.3236	79.0	0.4464	99.8
85-01-01	1.3372	79.8	0.4465	99.8
85-01-02	1.3430	80.1	0.4465	99.8
85-01-03	1.3430	80.1	0.4465	99.8
85-01-04	1.3487	80.5	0.4466	99.8
85-01-05	1.3487	80.5	0.4466	99.8
85-01-06	1.3487	80.5	0.4466	99.8
85-01-07	1.3487	80.5	0.4466	99.8
85-01-08	1.3487	80.5	0.4466	99.8
85-01-09	1.3632	81.3	0.4466	99.8
85-01-10	1.3632	81.3	0.4466	99.8
85-01-11	1.3653	81.5	0.4467	99.8
85-01-12	1.3653	81.5	0.4467	99.8
85-01-13	1.3653	81.5	0.4467	99.8
85-01-14	1.3654	81.5	0.4467	99.8
85-01-15	1.3690	81.7	0.4467	99.8
85-01-24	1.3697	81.7	0.4468	99.9
85-02-08	1.3738	82.1	0.4468	99.9
85-02-10	1.3788	82.3	0.4468	99.9
85-02-12	1.3811	82.4	0.4468	99.9
85-02-25	1.4114	84.2	0.4471	99.9
85-03-03	1.4154	84.5	0.4471	99.9
85-03-13	1.4186	84.7	0.4472	100.0
85-03-15	1.4145	84.4	0.4473	100.0
85-03-21	1.3996	83.5	0.4474	100.0
85-03-22	1.3956	83.3	0.4474	100.0
85-03-26	1.3834	82.5	0.4474	100.0
85-03-29	1.3437	80.2	0.4474	100.0
85-04-01	1.3363	79.7	0.4474	100.0
85-04-04	1.3132	78.4	0.4474	100.0
85-04-05	1.2990	77.5	0.4474	100.0
85-04-06	1.2737	76.0	0.4474	100.0
85-04-07	1.2404	74.0	0.4323	96.6
85-04-08	1.2290	73.3	0.4143	92.6
85-04-09	1.1273	67.3	0.3472	77.6
85-04-10	1.0793	64.4	0.3310	74.0
85-04-11	0.9630	57.5	0.3163	70.7
85-04-12	0.9336	55.7	0.3090	69.1
85-04-13	0.8582	51.2	0.2780	62.1
85-04-16	0.7135	42.6	0.2345	52.4

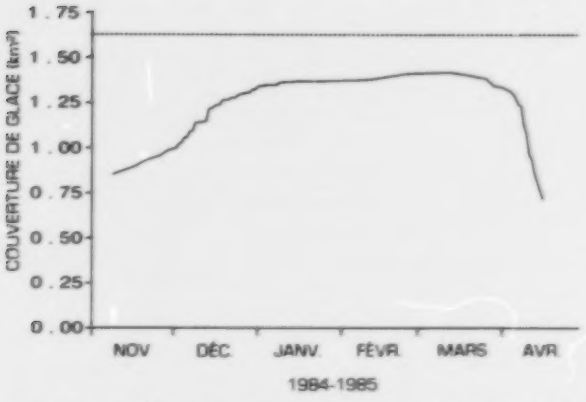


Figure 7. Surface de la couverture de glace, X4 à SG (novembre 1984 à avril 1985).

La figure 8 et le tableau 2 montrent l'épaisseur moyenne de la glace en M, à six dates au cours de l'étude. On trouve aussi une estimation du volume total de la glace de surface sur l'ensemble du tronçon, volume calculé en multipliant la surface de la couche par son épaisseur moyenne en M. Les deux courbes ont la même tendance, soit une croissance modérée pendant la prise des glaces, un état stationnaire au milieu de l'hiver et une diminution rapide à la débâcle.

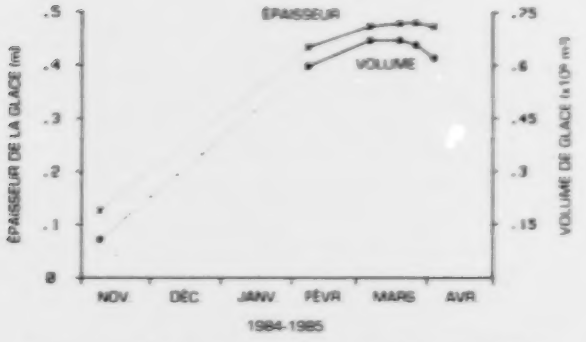


Figure 8. Épaisseur et volume de la glace (novembre 1984 à avril 1985).

Tableau 2. Volume et épaisseur de la glace

Date	Volume (m^3)		Épaisseur (m)
	X4 à SG	AM à M	M
84-11-09	108 244	36 204	0.127
85-02-08	397 097	193 911	0.434
85-03-07	670 099	211 526	0.473
85-03-20	670 204	213 809	0.478
85-03-27	657 696	214 752	0.480
85-04-04	619 830	211 173	0.472

Les températures plus douces et l'accumulation plus forte de neige ont fait que la couche de glace en 1984-1985 a été plus mince de 0.3 m environ que celle observée en 1983-1984.

Caractéristiques des barrages de frasil

Le barrage de frasil se définit comme l'accumulation en masse de particules de glace, ou slush de frasil, en dessous de la couverture de glace. Le frasil lui-même se forme dans les eaux turbulentes libres de glace en amont de la couverture de glace, quand il fait très froid, c'est-à-dire quand la température de l'air est à -20 °C ou moins. (Pour études, voir Osterkamp, 1978; Martin, 1981; et Tsang, 1982). Le frasil adhère ou non à un endroit donné selon la vitesse de l'eau, la rugosité de la glace et sa propre adhésivité qui est déterminée par sa température (0 °C ou moins).

Le barrage de frasil de Whitehorse a été étudié par Alford et Carmack (1987). On a noté que le barrage semblait se former chaque année et que sa forme fondamentale était constante d'une année à l'autre. On a aussi remarqué que la section transversale du barrage semblait atteindre sa limite pendant la période de prise des glaces pour décroître par la suite, d'abord lentement au milieu de l'hiver, puis rapidement juste avant la débâcle.

La figure 9 illustre les horizons de glace et de frasil observés en M. La figure 10 montre la section transversale du barrage pendant une période donnée. Ces mesures dénotent une croissance et une décroissance semblables à celles de 1983-1984.

On a obtenu d'autres courbes de barrage de frasil en AM, en X3, en BM et à une section qui se trouve juste en aval du chenal libre de glace en M (figure 11). Ces données démontrent que le barrage est continu sur toute la longueur du tronçon étudié et occupe un volume à peu près égal à celui de la glace de surface. Dans la partie médiane du tronçon étudié, la slush semble absente le long de l'axe du noyau de vitesse. En AM et en BM, cependant, le barrage de frasil est le plus épais au milieu du chenal, là où les vitesses sont les plus fortes. Lorsque le frasil adhère à la glace immédiatement au-dessus du noyau de vitesse et amène ainsi le courant à sortir de son chenal préféré, il semble que la résistance hydraulique du tronçon est plus grande que dans le cas du phénomène de dépôt de frasil sur les côtés du noyau de vitesse. Cependant, cette hypothèse mérite d'être étudiée plus à fond.

On a relevé en BM, deux profils verticaux de la dureté du barrage de frasil; pour ce faire on a utilisé une sonde de battage de la slush (Alford et Carmack, 1987). Les données ainsi recueillies (figure 12) laissent voir une dureté relative

maximale à mi-profondeur, tout comme on l'a observé en 1983-1984. On ignore actuellement les raisons morphologiques de cette caractéristique.

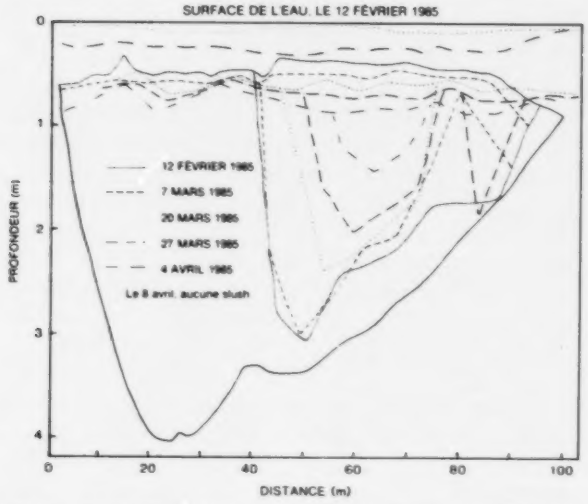


Figure 9. Profils du barrage de frasil en M (février à avril 1985).

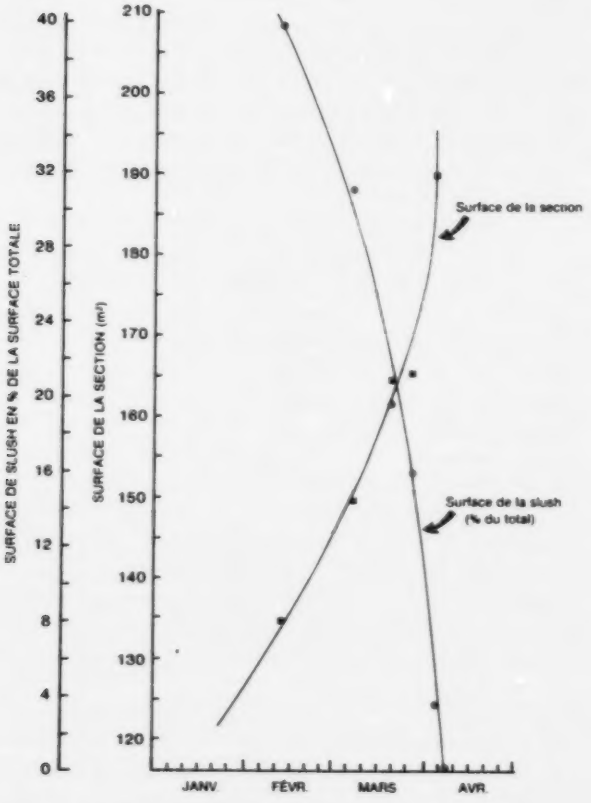


Figure 10. Section transversale du barrage de frasil en M (janvier à avril 1985).

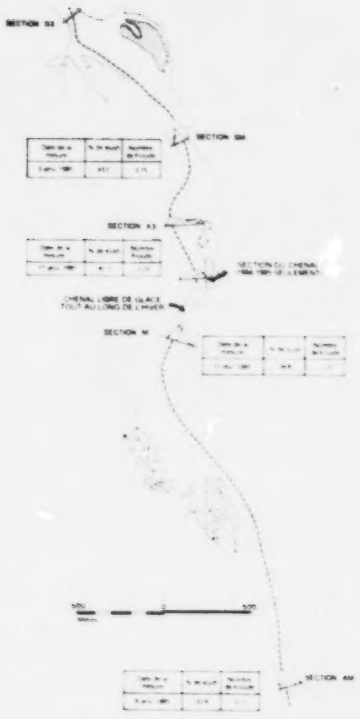


Figure 11. Schéma du dépôt du barrage de frasil (1984-1985).

Figure 12. Profils verticaux de la dureté du barrage de frasil.

Conditions hydrauliques

Le niveau de l'eau a été enregistré chaque jour tout au long de l'hiver en AM, M et BM, ainsi que pendant une courte durée au cours de la prise des glaces en X4. Pendant la prise des glaces, la résistance hydraulique d'une rivière augmente généralement, ce qui entraîne une augmentation correspondante de la hauteur d'écoulement. De même, la résistance globale décroît à la suite de la débâcle. Ces effets sur la résistance sont évidents si l'on consulte les données à la figure 13 et au tableau 3 concernant le niveau de l'eau.

Les niveaux de l'eau à toutes les stations ont augmenté rapidement au cours de la prise des glaces, ont diminué graduellement pendant l'hiver pour chuter abruptement à la suite de la débâcle. De même, la mesure de la pente de la ligne d'eau (figure 14) révèle des variations importantes tout au long de l'hiver, les pentes les plus prononcées et les variations les plus rapides survenant au cours de la prise des glaces. La variation du niveau de l'eau à des intervalles de temps donnés pendant le cycle hivernal est illustrée à la figure 15.

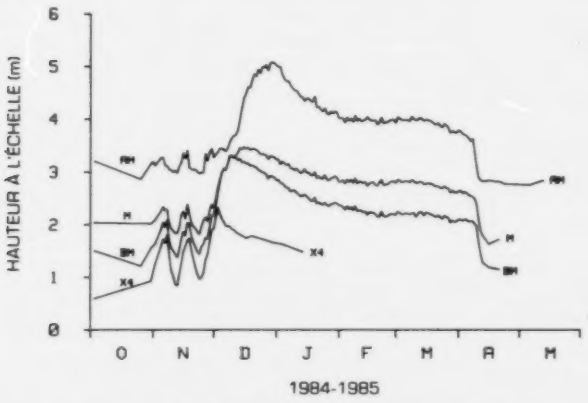


Figure 13. Niveaux de l'eau (octobre 1984 à mai 1985).

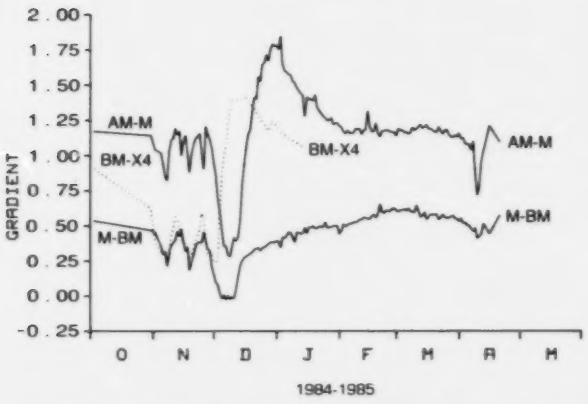


Figure 14. Pentes de la ligne d'eau (octobre 1984 à avril 1985).

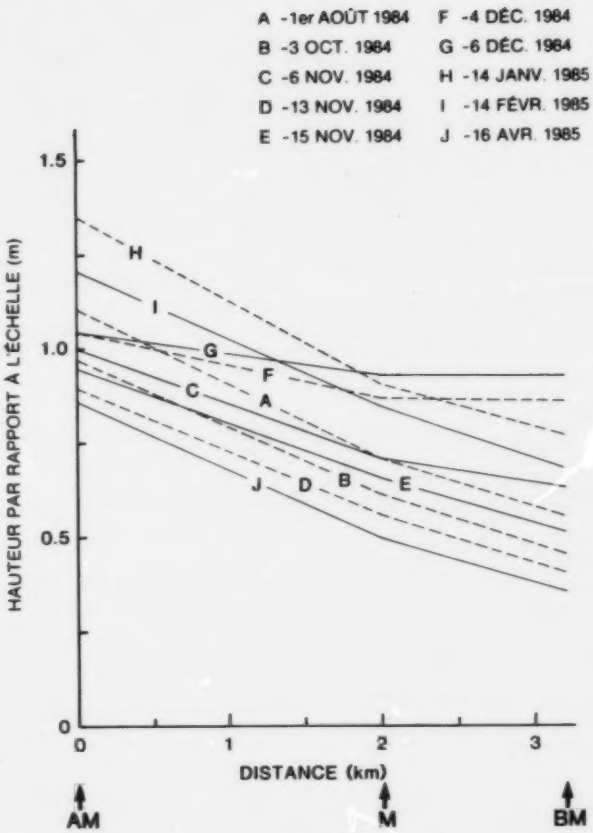


Figure 15. Hauteurs par rapport à l'échelle en AM, M, et BM à des intervalles de temps donnés.

L'effet de l'avance du front de glace sur le niveau de l'eau (l'effet de remous) est montré à la figure 16. Ici, le niveau de l'eau en AM fait l'objet d'une courbe qui le situe par rapport à la position du front de glace à l'intérieur du tronçon étudié. Il faut noter qu'il y a eu un léger effet de remous quand le front de glace a passé BM, et un accroissement beaucoup plus grand quand le front a atteint les environs de X2. Ce phénomène n'est pas étranger aux inondations.

Tableau 3. Valeurs quotidiennes du débit, du niveau de l'eau et de la pente de la ligne d'eau pendant l'hiver 1984–1985

Date	Débit ($m^3 s^{-1}$)	Niveau de l'eau				Pente de la ligne d'eau		
		AM (m)	M (m)	BM (m)	X4 (m)	AM-M (m)	M-BM (m)	BM-X4 (m)
84-10-03	217	3.200	2.031	1.498	0.590	1.169	0.533	0.908
84-10-26	144	2.860	–	1.207	–	–	–	–
84-10-31	166	3.155	2.015	1.548	0.924	1.140	0.467	0.624
84-11-01	177	3.200	–	–	–	–	–	–
84-11-02	188	3.120	2.080	1.628	1.245	1.040	0.452	0.383

Tableau 3 (suite)

Date	Débit ($m^3 s^{-1}$)	Niveau de l'eau				Pente de la ligne d'eau		
		AM (m)	M (m)	BM (m)	X4 (m)	AM-M (m)	M-BM (m)	BM-X4 (m)
84-11-05	158	3.270	2.256	1.912	1.585	1.014	0.354	0.317
84-11-06	160	3.276	2.337	2.043	1.722	0.939	0.294	0.321
84-11-07	164	3.120	2.266	1.950	1.648	0.854	0.316	0.302
84-11-08	165	3.110	2.289	2.076	1.800	0.821	0.316	0.302
84-11-09	161	3.050	2.019	1.697	1.445	1.031	0.322	0.252
84-11-10	158	3.030	1.921	1.563	1.130	1.109	0.358	0.433
84-11-11	159	3.000	1.879	1.500	1.020	1.121	0.379	0.480
84-11-12	159	3.020	1.831	1.432	0.865	1.189	0.399	0.567
84-11-13	156	2.980	1.831	1.373	0.830	1.149	0.458	0.543
84-11-14	157	3.102	1.931	1.504	–	1.171	0.427	–
84-11-15	157	3.180	2.182	1.705	–	0.998	0.477	–
84-11-16	157	3.360	2.251	1.866	1.485	1.109	0.385	0.381
84-11-17	159	3.250	2.111	1.791	–	1.139	0.320	–
84-11-18	161	3.410	2.391	2.041	1.695	1.019	0.350	0.346
84-11-19	159	3.080	2.201	2.016	1.740	0.879	0.185	0.276
84-11-20	159	3.050	2.041	1.793	1.510	1.009	0.248	0.283
84-11-21	159	3.040	1.961	1.668	1.340	1.079	0.293	0.328
84-11-22	159	3.045	1.926	1.574	1.185	1.119	0.352	0.389
84-11-23	164	3.000	1.866	1.484	1.055	1.134	0.382	0.429
84-11-24	160	2.970	1.816	1.435	0.960	1.154	0.381	0.475
84-11-25	159	2.990	1.961	1.580	0.990	1.029	0.381	0.590
84-11-26	160	2.990	2.086	1.630	1.090	0.904	0.456	0.540
84-11-27	157	3.345	2.141	1.751	1.330	1.204	0.390	0.421
84-11-28	158	3.210	2.061	1.731	1.430	1.149	0.330	0.301
84-11-29	155	3.380	2.271	1.947	1.660	1.109	0.324	0.287
84-11-30	156	3.440	2.386	2.177	1.890	1.054	0.209	0.287
84-12-01	155	3.275	2.326	2.172	1.925	0.949	0.154	0.247
84-12-02	149	3.330	2.461	2.263	2.125	0.869	0.098	0.238
84-12-03	146	3.375	2.681	2.603	2.330	0.694	0.078	0.273
84-12-04	141	3.440	2.841	2.823	2.210	0.599	0.018	0.613
84-12-05	148	3.450	2.976	2.995	2.118	0.474	-0.019	0.877
84-12-06	156	3.420	3.066	3.059	2.055	0.354	0.007	1.004
84-12-07	156	3.390	3.036	3.062	1.980	0.354	-0.026	1.082
84-12-08	155	3.450	3.156	3.155	1.970	0.294	0.001	1.185
84-12-09	155	3.570	3.291	3.313	1.965	0.279	-0.022	1.348
84-12-10	150	3.650	3.296	3.303	1.910	0.354	-0.007	1.393
84-12-11	146	3.685	3.271	3.288	1.900	0.414	-0.017	1.388
84-12-12	152	3.705	3.311	3.260	1.860	0.394	0.051	1.400
84-12-13	145	3.790	3.371	3.228	1.830	0.419	0.143	1.398
84-12-14	141	4.000	3.461	3.243	–	0.539	0.218	–
84-12-15	141	4.220	3.431	3.178	–	0.789	0.253	–
84-12-16	147	4.400	3.471	3.198	–	0.929	0.273	–
84-12-17	143	4.490	3.441	3.158	1.745	1.049	0.283	1.413
84-12-18	147	4.610	3.461	3.168	–	1.149	0.293	–
84-12-19	145	4.600	3.421	3.118	–	1.170	0.303	–
84-12-20	143	4.740	3.441	3.128	1.780	1.299	0.313	1.348
84-12-21	144	4.850	3.441	3.108	–	1.409	0.333	–
84-12-22	144	4.820	3.421	3.083	–	1.300	0.338	–
84-12-23	142	4.945	3.391	3.048	–	1.554	0.343	–
84-12-24	141	4.870	3.341	3.018	–	1.529	0.323	–
84-12-25	142	4.986	3.341	2.998	–	1.645	0.343	–
84-12-26	142	4.990	3.331	2.983	–	1.659	0.348	–
84-12-27	142	5.030	3.316	2.958	–	1.714	0.358	–
84-12-28	142	4.915	3.241	2.868	1.690	1.674	0.373	1.178
84-12-29	143	5.065	3.311	2.928	–	1.754	0.383	–

Tableau 3 (suite)

Date	Débit ($m^3 s^{-1}$)	Niveau de l'eau				Pente de la ligne d'eau		
		AM (m)	M (m)	BM (m)	X4 (m)	AM-M (m)	M-BM (m)	BM-X4 (m)
84-12-30	141	5.085	3.296	2.913	1.660	1.789	0.383	1.253
84-12-31	140	5.060	3.281	2.898	–	1.779	0.383	–
85-01-01	138	5.025	3.241	2.848	–	1.784	0.393	–
85-01-02	140	4.995	3.241	2.854	–	1.754	0.387	–
85-01-03	141	4.984	3.141	2.796	–	1.843	0.345	–
85-01-04	142	4.845	3.196	2.779	1.625	1.649	0.417	1.154
85-01-05	140	4.760	3.161	2.747	–	1.599	0.414	–
85-01-06	139	4.720	3.131	2.700	–	1.589	0.431	–
85-01-07	139	4.725	3.151	2.696	–	1.574	0.455	–
85-01-08	139	4.644	3.076	2.627	–	1.568	0.449	–
85-01-09	140	4.590	3.065	2.647	–	1.525	0.418	–
85-01-10	139	4.545	3.031	2.647	–	1.514	0.384	–
85-01-11	138	4.540	3.061	2.607	–	1.479	0.454	–
85-01-12	140	–	–	–	–	–	–	–
85-01-13	135	4.420	2.981	2.537	–	1.439	0.444	–
85-01-14	136	4.415	2.991	2.544	1.480	1.424	0.447	1.064
85-01-15	134	4.340	2.061	2.574	–	1.279	0.487	–
85-01-16	137	4.400	2.986	2.538	–	1.414	0.448	–
85-01-17	140	4.390	2.991	2.499	–	1.399	0.492	–
85-01-18	136	4.340	2.941	2.455	–	1.399	0.486	–
85-01-19	133	4.330	2.941	2.444	–	1.389	0.497	–
85-01-20	132	4.430	3.001	2.517	–	1.429	0.484	–
85-01-21	122	4.225	2.881	2.399	–	1.344	0.482	–
85-01-22	135	4.240	2.921	2.425	–	1.319	0.496	–
85-01-23	132	4.180	2.881	2.389	–	1.299	0.492	–
85-01-24	132	4.150	2.871	2.378	–	1.279	0.493	–
85-01-25	133	4.210	2.943	2.418	–	1.267	0.525	–
85-01-26	134	4.110	2.861	2.373	–	1.249	0.488	–
85-01-27	132	4.085	2.836	2.348	–	1.249	0.488	–
85-01-28	134	4.150	2.881	2.388	–	1.269	0.493	–
85-01-29	140	4.110	2.891	2.394	–	1.219	0.497	–
85-01-30	132	4.150	2.921	2.419	–	1.229	0.502	–
85-01-31	138	4.120	2.891	2.394	–	1.229	0.497	–
85-02-01	136	4.020	2.811	2.369	–	1.209	0.442	–
85-02-02	137	4.020	2.821	2.355	–	1.199	0.466	–
85-02-03	133	4.010	2.841	2.330	–	1.169	0.511	–
85-02-04	137	3.930	2.776	2.280	–	1.154	0.496	–
85-02-05	134	4.035	2.856	2.350	–	1.179	0.506	–
85-02-06	136	3.970	2.811	2.296	–	1.159	0.515	–
85-02-07	133	4.010	2.851	2.335	–	1.159	0.516	–
85-02-08	133	3.950	2.791	2.266	–	1.159	0.525	–
85-02-09	132	4.070	2.881	2.355	–	1.189	0.526	–
85-02-10	132	3.965	2.781	2.251	–	1.184	0.530	–
85-02-11	133	4.010	2.821	2.276	–	1.189	0.545	–
85-02-12	129	3.960	2.811	2.266	–	1.149	0.545	–
85-02-13	128	3.970	2.791	2.231	–	1.179	0.560	–
85-02-14	130	3.995	2.811	2.256	–	1.184	0.555	–
85-02-15	129	4.045	2.731	2.181	–	1.314	0.550	–
85-02-16	131	3.990	2.791	2.242	–	1.199	0.549	–
85-02-17	128	3.970	2.801	2.231	–	1.169	0.570	–
85-02-18	129	3.980	2.806	2.227	–	1.174	0.579	–
85-02-19	127	3.980	2.751	2.192	–	1.229	0.559	–
85-02-20	127	3.898	2.741	2.152	–	1.157	0.589	–
85-02-21	125	3.935	2.801	2.147	–	1.134	0.654	–
85-02-22	125	4.030	2.856	2.257	–	1.174	0.599	–

Tableau 3 (suite)

Date	Débit ($m^3 s^{-1}$)	Niveau de l'eau				Pente de la ligne d'eau		
		AM (m)	M (m)	BM (m)	X4 (m)	AM-M (m)	M-BM (m)	BM-X4 (m)
85-02-23	121	3.926	2.753	2.162	–	1.173	0.591	–
85-02-24	120	3.940	2.761	2.152	–	1.179	0.609	–
85-02-25	121	3.950	2.771	2.162	–	1.179	0.609	–
85-02-26	127	3.970	2.801	2.197	–	1.169	0.604	–
85-02-27	129	3.990	2.824	2.202	–	1.166	0.622	–
85-02-28	131	3.990	2.826	2.201	–	1.164	0.625	–
85-03-01	130	3.930	2.791	2.181	–	1.139	0.610	–
85-03-02	138	4.040	2.851	2.250	–	1.189	0.601	–
85-03-03	137	4.010	2.831	2.220	–	1.179	0.611	–
85-03-04	137	3.980	2.801	2.189	–	1.179	0.612	–
85-03-05	136	3.980	2.816	2.199	–	1.164	0.617	–
85-03-06	145	3.990	2.826	2.218	–	1.164	0.608	–
85-03-07	143	3.980	2.826	2.203	–	1.154	0.623	–
85-03-08	144	3.960	2.801	2.197	–	1.159	0.604	–
85-03-09	149	4.050	2.851	–	–	1.199	–	–
85-03-10	150	4.000	2.821	2.225	–	1.179	0.596	–
85-03-11	153	3.980	2.791	2.145	–	1.189	0.646	–
85-03-12	151	3.990	–	–	–	–	–	–
85-03-13	153	4.030	2.811	2.249	–	1.219	0.562	–
85-03-14	150	4.000	2.806	2.233	–	1.194	0.573	–
85-03-15	150	3.970	2.766	2.170	–	1.204	0.596	–
85-03-16	153	3.995	2.776	2.232	–	1.219	0.544	–
85-03-17	153	3.980	2.791	2.221	–	1.189	0.570	–
85-03-18	152	3.970	2.781	2.200	–	1.189	0.581	–
85-03-19	152	3.950	2.771	2.190	–	1.179	0.581	–
85-03-20	150	3.910	2.741	2.160	–	1.169	0.581	–
85-03-21	150	3.895	2.731	2.150	–	1.164	0.581	–
85-03-22	148	3.930	2.726	2.180	–	1.204	0.546	–
85-03-23	146	3.875	2.701	2.140	–	1.174	0.561	–
85-03-24	149	3.845	2.691	2.110	–	1.154	0.581	–
85-03-25	147	3.910	2.731	2.170	–	1.179	0.561	–
85-03-26	133	3.880	2.696	2.140	–	1.184	0.556	–
85-03-27	135	3.835	2.686	2.130	–	1.149	0.556	–
85-03-28	125	3.740	2.606	2.040	–	1.134	0.566	–
85-03-29	128	3.780	2.651	2.078	–	1.129	0.573	–
85-03-30	124	3.750	2.606	2.053	–	1.144	0.553	–
85-03-31	122	3.740	2.606	2.058	–	1.134	0.548	–
85-04-01	124	3.790	2.631	2.098	–	1.159	0.533	–
85-04-02	131	3.770	2.651	2.098	–	1.119	0.553	–
85-04-03	133	3.720	2.596	2.078	–	1.124	0.518	–
85-04-04	127	3.700	2.616	2.093	–	1.084	0.523	–
85-04-05	126	3.680	2.601	2.098	–	1.079	0.503	–
85-04-06	124	3.640	2.561	2.058	–	1.079	0.503	–
85-04-07	126	3.580	2.541	2.063	–	1.039	0.478	–
85-04-08	127	3.630	2.531	2.068	–	1.099	0.463	–
85-04-09	128	3.380	2.491	2.008	–	0.889	0.483	–
85-04-10	134	3.100	2.381	1.969	–	0.719	0.412	–
85-04-11	116	2.890	2.111	1.686	–	0.779	0.425	–
85-04-12	111	2.840	1.881	1.436	–	0.959	0.445	–
85-04-13	112	2.820	1.791	1.276	–	1.029	0.515	–
85-04-16	116	2.840	1.631	1.186	–	1.209	0.445	–
85-04-19	110	2.820	–	–	–	–	–	–
85-04-21	119	2.820	1.721	1.146	–	1.099	0.575	–
85-04-24	–	2.770	–	–	–	–	–	–
85-05-06	–	2.750	–	–	–	–	–	–
85-05-13	–	2.840	–	–	–	–	–	–

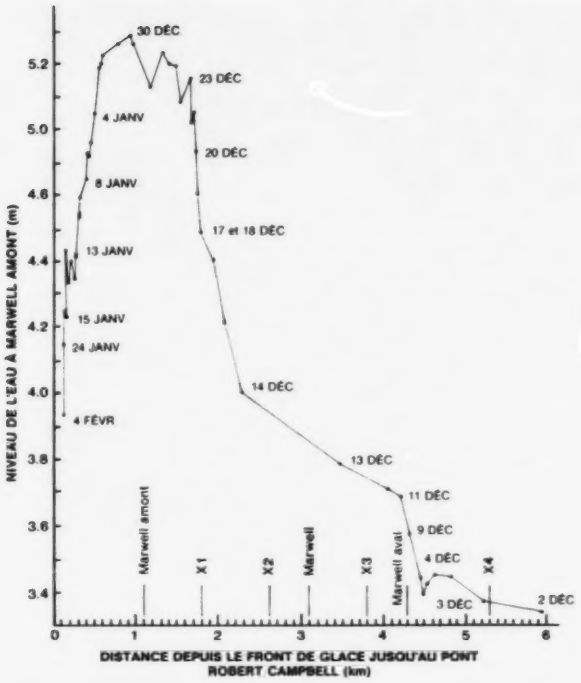


Figure 16. Niveau de l'eau en AM par rapport à la position du front de glace.

OBSERVATIONS DE PROCESSUS SPÉCIFIQUES

Changement de la température de l'eau au cours de la prise des glaces

Alford et Carmack (1987) ont signalé plusieurs phénomènes qui peuvent influer sur la formation de la couche de glace et sur le débit d'écoulement dans le tronçon. Dans la présente étude, d'autres observations ont été ajoutées permettant d'étudier plus en détail certains de ces processus.

On trouve à la figure 17 les données relatives au changement de la température de l'eau le long du tronçon, à différents moments de la prise des glaces. Dans un cas type, la température a changé d'environ 0.3 °C entre le pont et BM, ce qui donne un gradient de température longitudinal de $dT/dL = 0.07$ °C/km, où T est la température de l'eau et L est la distance le long du tronçon.

Dans quelle mesure doit-on tenir compte du flux thermique de surface dans le gradient de température longitudinal observé? Si l'on a une vitesse moyenne $\langle V \rangle = 0.7$ m/s, on note qu'une colonne d'eau se déplaçant dans le tronçon étudié se refroidit au taux de $dT/dt = \langle V \rangle dT/dL$, soit environ 0.5×10^{-4} °C/s. Si la profondeur moyenne du tronçon est de 2 m, on obtient un flux thermique de surface de 390 W m^{-2}. Bien sûr, il faut considérer cette valeur comme une estimation approximative, mais elle est conforme aux mesures du flux thermique faites auparavant par Alford et Carmack (1987).

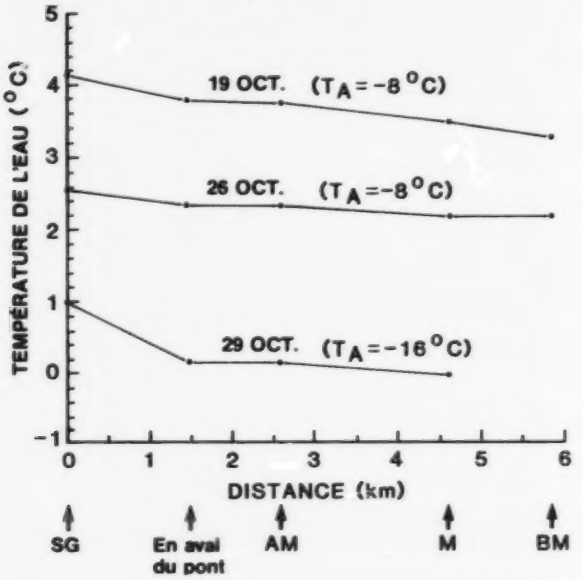


Figure 17. Gradients de la température de l'eau avant la prise des glaces. (T_A indique la température de l'air correspondante.)

Croissance de la glace de rive

Comme on l'a mentionné plus haut, la période de prise des glaces se caractérise par un rapprochement graduel de la glace de rive jusqu'à la formation d'un chenal le long du noyau de vitesse, conjugué à l'avance progressive du front de glace par le dépôt des floes formées en amont. Il ne faut pas croire que les deux mécanismes sont indépendants l'un de l'autre, puisque, plus le chenal est étroit, plus vite il se remplit de glaces à la dérive.

Osterkamp et Gosink (1983) signalent que la glace de rive effectue une progression latérale selon au moins trois mécanismes : échange thermique par conduction à travers la glace, accumulation du frasil à la dérive, et perte de chaleur latente à l'eau super-refroidie du fleuve. La figure 18 montre la croissance de la glace de rive par accumulation de frasil. La figure 19 montre la présence d'éléments dendritiques dans la glace de rive à un moment où la perte de chaleur en surface est élevée et où il y a une grande quantité de frasil dans l'eau qui s'écoule.

Puisqu'il y avait un chenal libre de glace près de Marwell, il s'est avéré commode de mesurer le taux de croissance de la glace de rive en relation avec le niveau de l'eau.

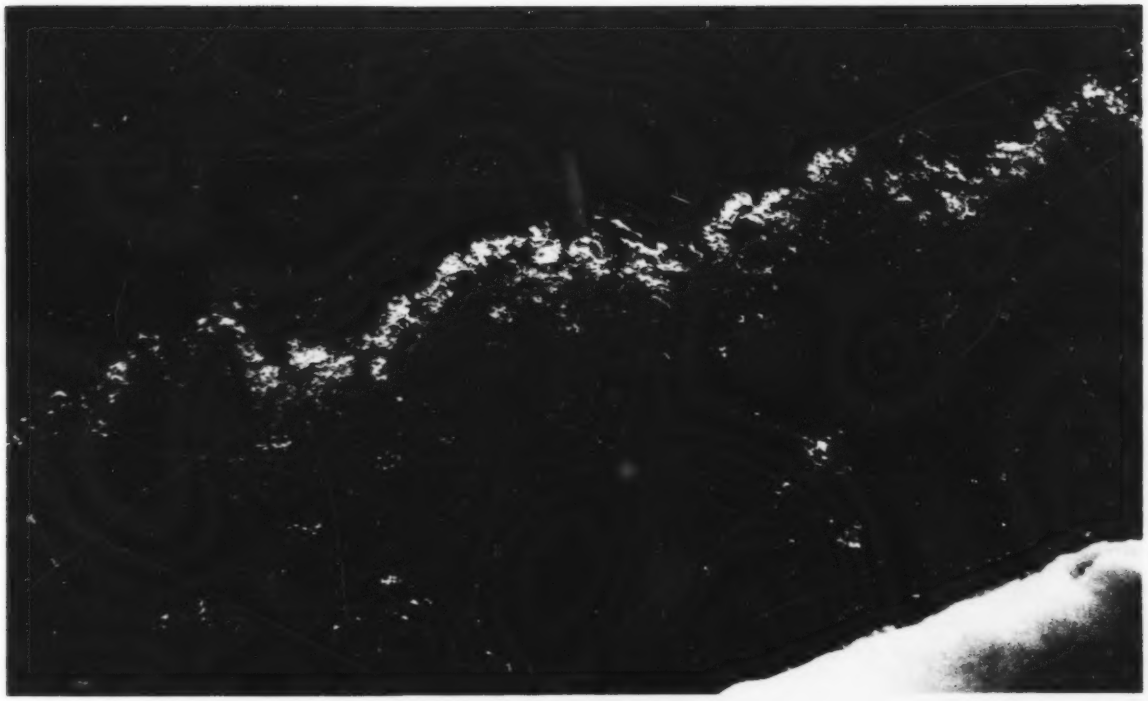


Figure 18. Dépôt diurne du frasil sur la glace de rive.

Figure 19. Présence d'éléments dendritiques le long de l'extrémité de la glace de rive.

Les données obtenues (figure 20) laissent croire à une forte relation avec la température de l'air. Si l'on trace un corrélogramme du taux de croissance de la glace de rive en fonction de la température de l'air (figure 21), on obtient une régression simple :

$$dW/dt = AT_a \text{ (en m/jour)}$$

où dW/dt = progression latérale de la glace de rive

T_a = température de l'air

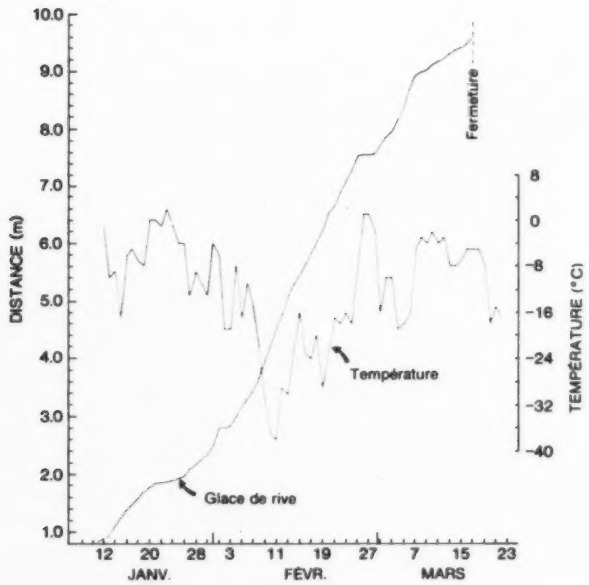


Figure 20. Température de l'air et croissance de la glace de rive en une section à surface libre en M (janvier à mars 1985).

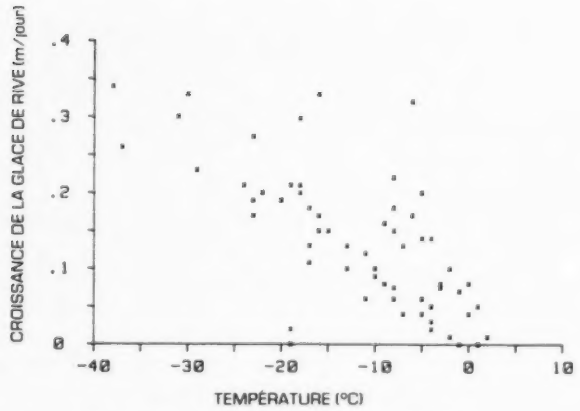


Figure 21. Taux de croissance de la glace de rive en fonction de la température de l'air.

A = coefficient d'ajustement de courbe qui s'applique (seulement) à ce tronçon du fleuve (A = 0.01 m/jour °C).

Si la température moyenne, à Whitehorse, est d'à peu près -20 °C, on peut estimer que la glace de rive progresse à une vitesse d'environ 1 m par cinq jours.

Les fluctuations du niveau de l'eau influent aussi sur la glace de rive. On a en outre observé la formation de glace de rive que l'on a traduit en croquis pour expliquer certaines raisons qui font que la glace de rive est plus épaisse et possiblement plus inégale que la couverture de glace du centre (figure 22). On trouve aussi dans Osterkamp et Gosink (1983) la description d'autres caractéristiques structurales de la glace de rive, relativement au cisaillement et au dépôt du frasil.

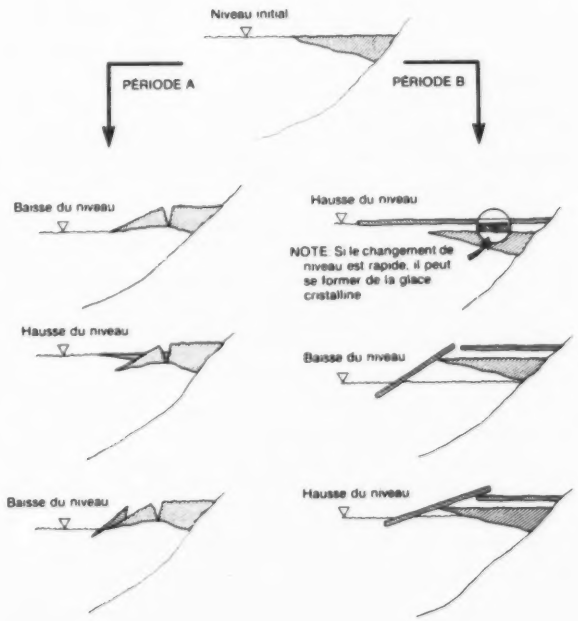


Figure 22. Schéma des changements structuraux dans la croissance de la glace de rive.

Avance du front de glace

L'avance du front de glace dans le tronçon est de première importance technique, étant donné que c'est pendant ce temps que la région Marwell de Whitehorse est plus sujette aux inondations. On a observé l'avance du front de glace sur la longueur du tronçon tant en 1983-1984 qu'en 1984-1985 (figure 23). Il semble d'après cette carte, que

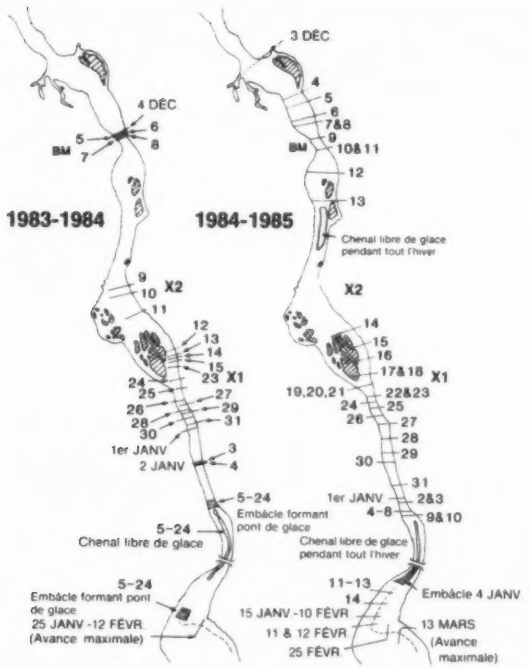


Figure 23. Avance du front de glace (1983-1984 et 1984-1985).

le front de glace progresse très rapidement de BM à X2, ralentit de X2 à X1 et avance très lentement au-delà de X1. Nous avons noté précédemment (figure 16) que l'effet de remous s'accroît quand le front de glace passe X2, ce qui laisse croire que les possibilités d'inondation sont reliées à la vitesse de progression du front de glace.

Distribution de la vitesse

La vitesse varie fortement tant dans le temps que dans l'espace. Les observations décrites ci-dessous illustrent comment certaines conditions hydrauliques peuvent modifier les profils verticaux de vitesse.

L'existence d'un chenal libre de glace à Marwell nous a permis d'examiner les conditions hydrauliques associées à ce chenal et de comprendre en gros le dépôt du frasil en aval du même chenal.

Les profils verticaux de vitesse en aval du chenal (figure 24) montrent la formation progressive de la couche limite sous-jacente à la glace. À une distance de 5 m de l'extrémité de l'eau libre de glace, le profil de vitesse est très semblable à celui de l'eau libre de glace, une couche limite se développant seulement dans le 0.1 m du haut. À 20 m du bord de l'eau libre de glace, cependant, le profil est beaucoup plus régulier et la couche limite semble s'être entièrement formée.

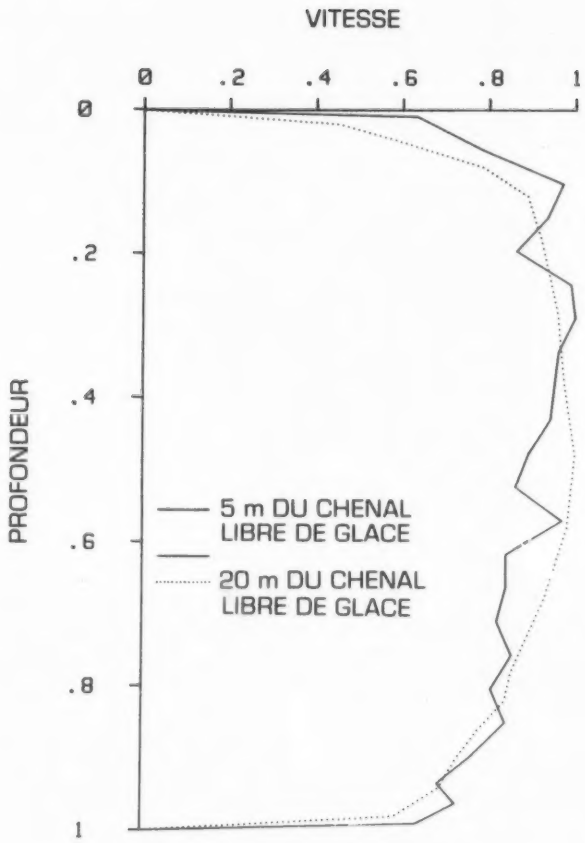


Figure 24. Profils de la vitesse derrière le chenal libre de glace.

Une coupe longitudinale en aval du chenal libre de glace (figure 25) montre que des accumulations de frasil se forment à 8 ou 10 m en aval de l'eau libre de glace. À ce moment, la surface inférieure de la glace en aval du

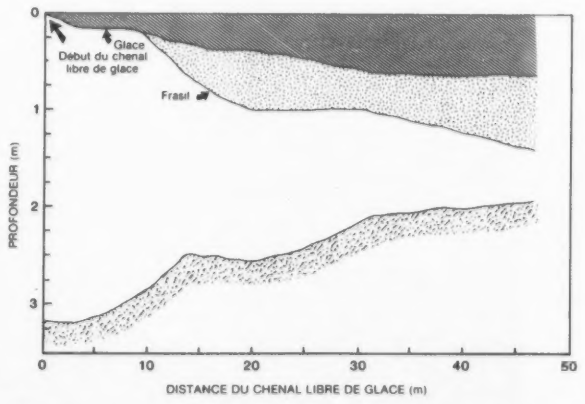


Figure 25. Formation d'un dépôt de frasil derrière le chenal libre de glace.

chenal est très lisse, ce qui ne favorise pas le dépôt immédiat de frasil.

La présence d'un barrage de frasil peut aussi influer sur la forme du profil de vitesse et présenter une rugosité différente à l'écoulement. C'est ce que montrent les profils de la figure 26 qui permettent de comparer l'écoulement sous une glace lisse et celui sous un barrage de frasil. Dans ce cas, il semble que la vitesse de frottement est plus grande sous un barrage de frasil plus irrégulier que sous la surface lisse de la glace où le frasil est absent.

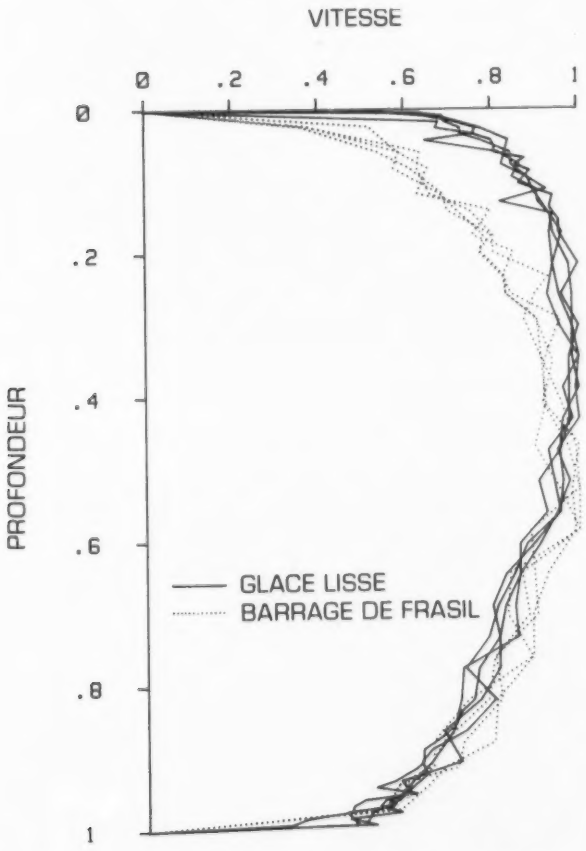


Figure 26. Profils de la vitesse au-dessous de la glace lisse et au-dessous du barrage de frasil.

Formation des rides à la surface de la glace

À l'arrivée du printemps, des instabilités dans l'écoulement de l'eau chaude (peut-être 0.02 °C) entraînent des caractéristiques ondulées, appelées rides, à la surface de contact eau-glace (Carey, 1966; Ashton et Kennedy, 1972). La mécanique des fluides de l'échange thermique à la surface de contact eau-glace, lorsqu'il y a écoulement turbulent, a fait l'objet d'une étude de Gilpin et coll. (1980). Alford et Carmack (1987) ont noté que la résistance hydraulique du tronçon semblait augmenter avec l'apparition des rides.

Pour examiner l'évolution de ces caractéristiques pendant une période donnée, on a découpé des blocs de glace, on les a retournés et enduits de peinture en aérosol, puis photographiés. De façon typique, l'observation (comme dans le cas de M, situé à 30 m de la rive gauche) révèle un changement marqué de la nature de la surface de contact eau-glace sur un intervalle très court. À l'origine, la surface de la glace ne montre aucune marque (figure 27). Puis, quand les radiations solaires commencent à pénétrer la couverture de glace et à chauffer l'eau qui s'y trouve, des rides commencent à se former (figure 28). Au début, les rides ont des crêtes droites. À mesure que les rides se creusent, elles extraient plus d'énergie de l'eau qui s'écoule et les crêtes deviennent fortement ondulées (figure 29). Dans les dernières étapes, les crêtes des rides deviennent interrompues et brisées (figure 30) et ne peuvent alors plus être tracées sur des longueurs qui dépassent celles des ondes. À ce moment, les rides ont une amplitude de l'ordre de 5 cm.

DISCUSSION

Orientations générales

Le tableau 4 compare brièvement certaines des caractéristiques observées pendant les hivers 1983-1984 et 1984-1985. De façon générale, l'hiver 1984-1985 a connu des températures de l'air plus élevées et des chutes de neige plus fortes que l'hiver précédent. Au cours de la seconde année de l'étude, la débâcle s'est produite plus tard. En outre, pendant la deuxième année, la glace était plus mince et le chenal à Marwell est resté libre de glace tout au long de l'hiver.

En se basant sur ces deux années d'observation, on peut présenter les remarques préliminaires suivantes sur l'évolution de la prise des glaces et de la débâcle du fleuve Yukon à Whitehorse :

1) Des embâcles de prise des glaces et des ponts de glace peuvent se former dans les parties étroites de X4, près du dépôt et immédiatement en amont du pont Robert Campbell.

2) La plus rapide avance du front de glace se produit entre BM et X2.

3) Les niveaux de l'eau les plus élevés surviennent pendant l'avance du front de glace entre M et AM.

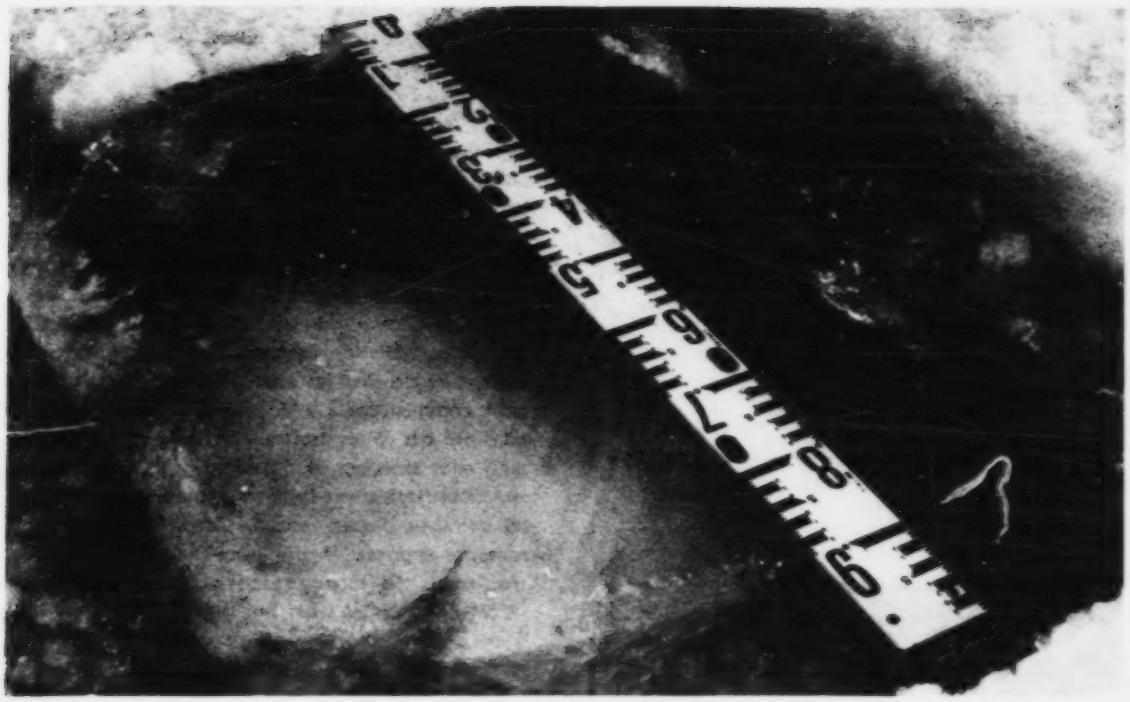


Figure 27. Surface de la glace ne montrant aucune marque (13 mars 1985).

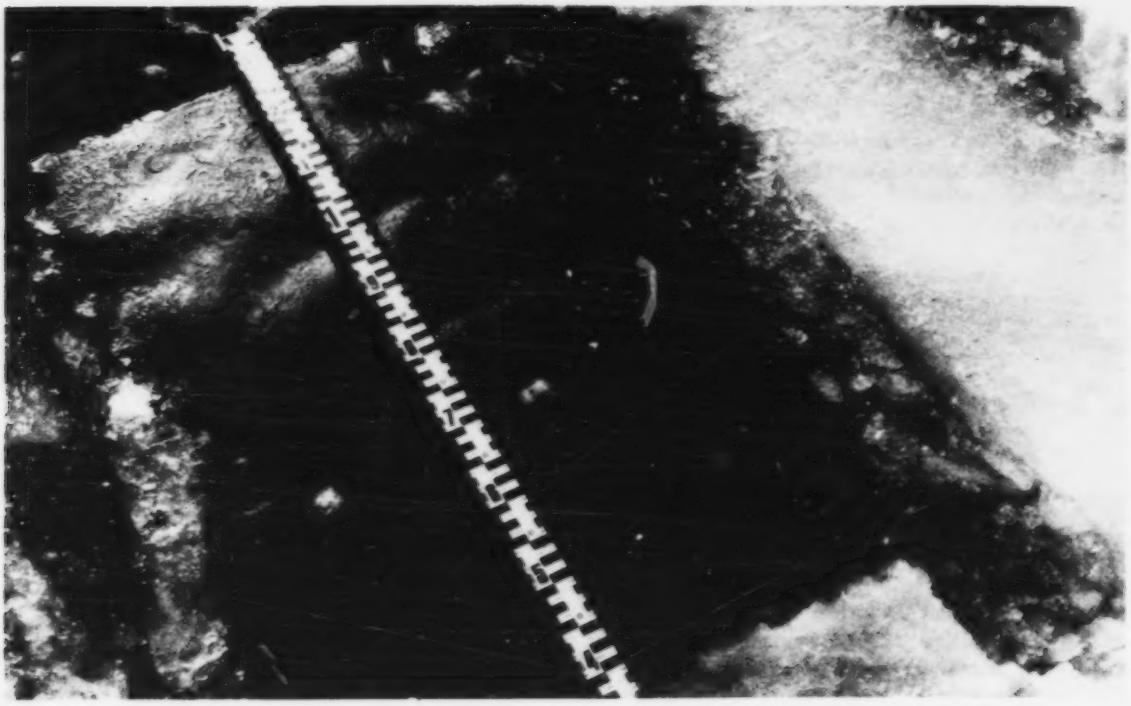


Figure 28. Rides commençant à se former (28 mars 1985).

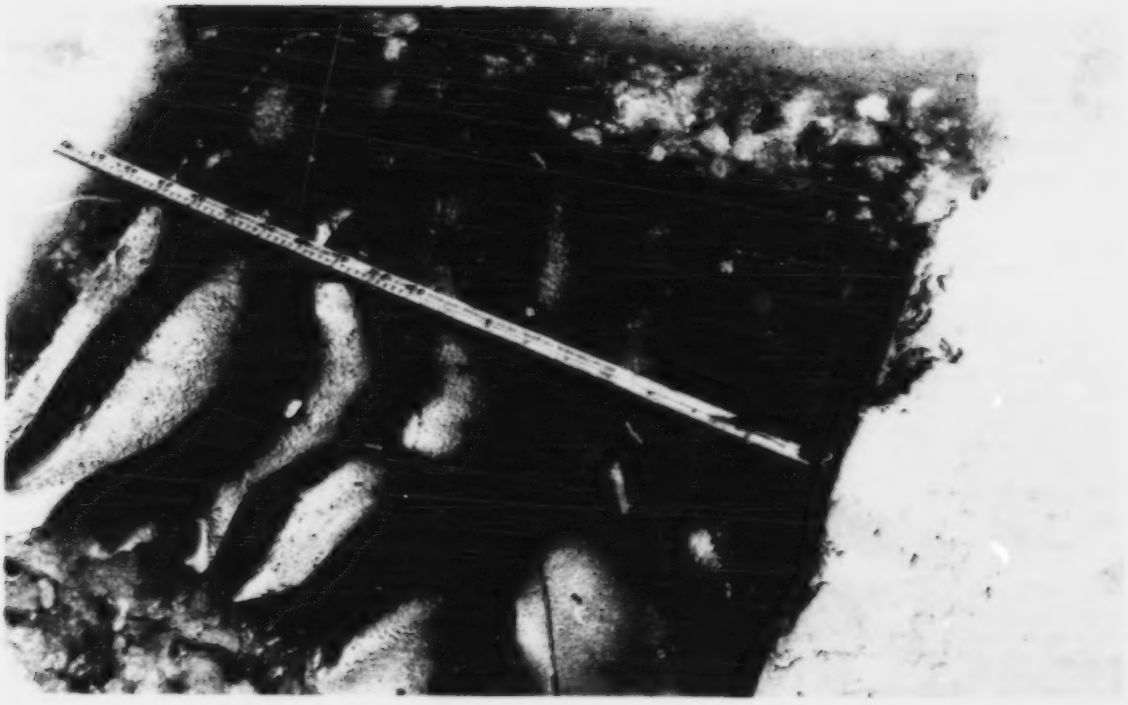


Figure 29. Crêtes devenant fortement ondulées (2 avril 1985).

Figure 30. Crêtes devenant interrompues et brisées (8 avril 1985).

4) Des chenaux peuvent rester libres de glace tout au long de l'hiver, en aval du pont.

5) La débâcle, bien qu'elle augmente la résistance hydraulique du tronçon du fleuve, a peu d'effets sur le niveau de l'eau.

Tableau 4. Comparaison sommaire des hivers 1983-1984 et 1984-1985

Faits	Hiver 1983-1984	Hiver 1984-1985
Date de l'arrivée du front de glace en BM	4 déc.	9 déc.
Date de l'arrivée du front de glace en M	9 déc.	13 déc.
Date de l'arrivée du front de glace en AM (date de la prise des glaces)	2 janv.	29 déc.
Épaisseur maximale de la glace en M	1.0 m	0.7 m
Date d'épaisseur maximale de la glace en M	7 févr.	19 mars
Pourcentage maximal de la surface du barrage de frasil en M	41.6 %	39.8 %
Date du pourcentage maximal de la surface du barrage de frasil en M	14 déc.	12. févr.
Niveau maximal de l'eau en M	3.501 m	3.471 m
Date du niveau maximal de l'eau en M	9 déc.	16 déc.
Niveau maximal de l'eau en AM	4.812 m	5.085 m
Date du niveau maximal de l'eau en AM	1er janv.	30 déc.
Date de libération des glaces à la station White Pass	22 mars	8 avr.
Date de libération des glaces en AM	23 mars	8 avr.
Date de libération des glaces en M	25 mars	10 avr.
Date de libération des glaces en BM (date de la débâcle)	29 mars	12 avr.
Chutes de neige du 1er nov. au 31 mars*	0.724 m	1.672 m

*Enregistrées par le Service de l'environnement atmosphérique à Whitehorse.

Formation de barrages de frasil

Les observations que nous avons faites jusqu'à ce jour laissent croire que la géométrie du cours d'eau influe sur le dépôt du frasil de sorte que le frasil se forme aux mêmes endroits chaque année, ce qui va probablement donner la même surface et le même profil transversal d'année en année. Les barrages semblent augmenter de volume jusqu'à ce que la couverture de glace se stabilise (immédiatement après la prise des glaces) puis subir une érosion graduelle jusqu'à la débâcle.

La composition de la slush varie constamment au cours de la saison. Elle peut, au début, ressembler à de fins disques ou de fines spicules, pour paraître comme des nodules ayant la forme et la grosseur d'oeufs de mouette, juste avant la débâcle. Ce dernier point a d'ailleurs été signalé par D. Lawson et E. Chacho (1985, U.S. Army, Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory; communication personnelle). En outre, les barrages de frasil ont une structure verticale et la slush a une dureté maximale à 1 m environ au-dessous de la surface de contact de la glace et de la slush.

Enfin, nous notons qu'il y a deux genres possibles de dépôt de frasil pendant la période de la prise des glaces. Le premier est le dépôt latéral, qui se produit sous la glace de rive, et le second est le dépôt médian, qui se produit sous la dernière partie de la glace à prendre, à l'endroit où la vitesse est la plus forte et la glace la plus rugueuse. C'est ce dernier point qui peut fortement influer sur la capacité d'adduction du chenal.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier E. Marles et V. Chamberlain pour leur enthousiasme (au froid) dans la cueillette des données et dans la réduction (fastidieuse) de ces données. Nous désirons en outre remercier M. Jarvis pour son aide dans la détermination des niveaux de l'eau.

Les dessins et illustrations sont l'oeuvre de B. Gordon, de Gordon Enterprises de Vancouver.

Enfin, nous sommes reconnaissants au personnel de la centrale hydro-électrique des rapides de Whitehorse qui nous a fourni les données sur l'écoulement fluvial, ainsi qu'à l'Arctic Diamond Drilling Inc., à Marwell, qui nous a permis de traverser ses terrains chaque jour.

RÉFÉRENCES

Alford, M.E., et E.C. Carmack. 1987. Observations sur le manteau glaciel et le débit du fleuve Yukon près de Whitehorse en 1983-1984. Rapport nº 32 de l'INRH, Étude nº 152, Série scientifique de l'Institut national de recherche en hydrologie, Direction générale des eaux intérieures et des terres, Environnement Canada, Saskatoon (Sask.).

Ashton, G.D., et J.F. Kennedy. 1972. Ripples on the underside of river ice covers. J. Hydraul. Eng., 98: 1603-24.

Carey, K.L. 1966. Observed configuration and computed roughness of the underside of river ice, St. Croix River, Wisconsin. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 550-B: 192-96.

Gilpin, R.R., T. Hirrata, et K.C. Cheng. 1980. Wave formation and heat transfer at an ice-water interface in the presence of a turbulent flow. J. Fluid Mech., 99: 619-40.

Martin, S. 1981. Frazil ice in rivers and oceans. Annu. Rev. Fluid Mech., 13: 379-97.

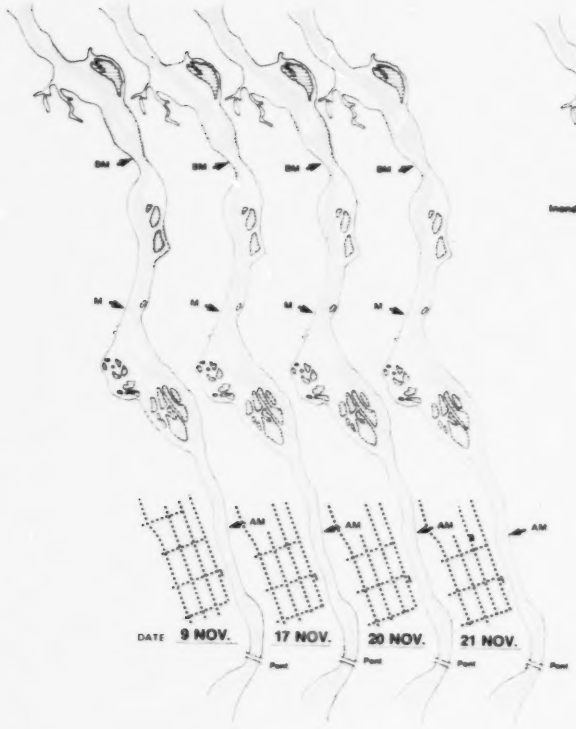
Osterkamp, T.E. 1978. Frazil ice formation: a review. J. Hydraul. Eng., 104: 1239-55.

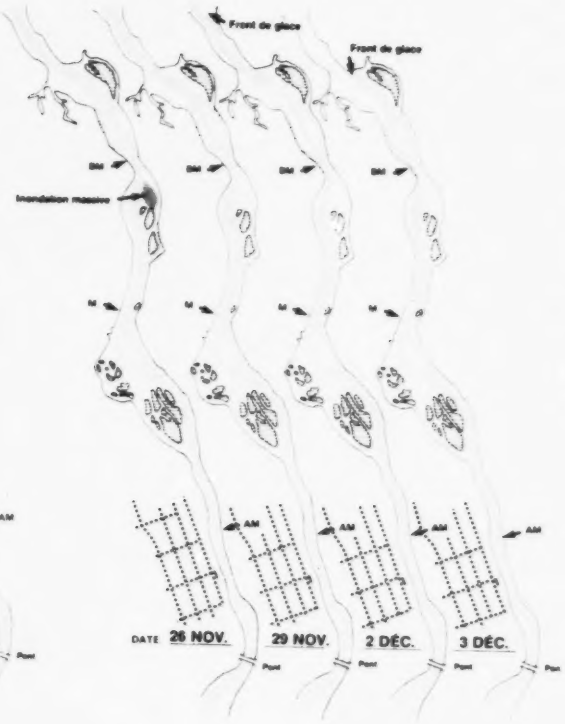
Osterkamp, T.E., et J.P. Gosink. 1983. Frazil ice formation and ice cover development in interior Alaska streams. Cold Reg. Sci. Technol., 8: 43-56.

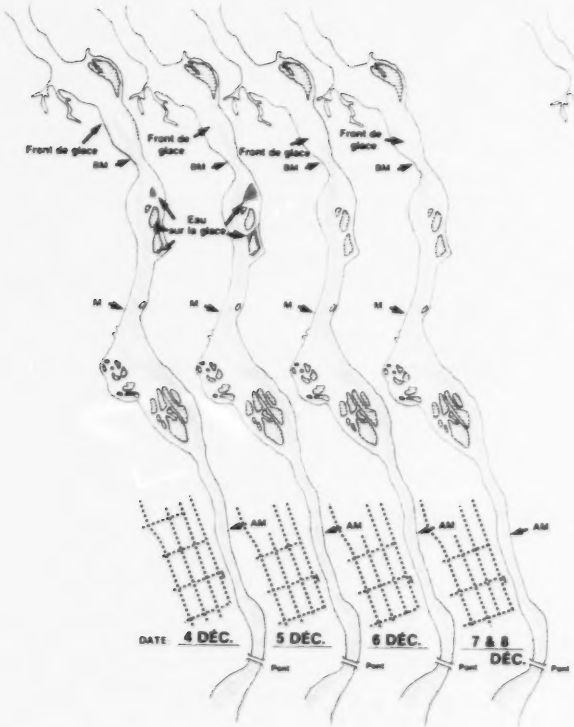
Tsang, G. 1982. Frazil and Anchor Ice. National Research Council Subcommittee on Hydraulics of Ice Covered Rivers, Ottawa (Ont.).

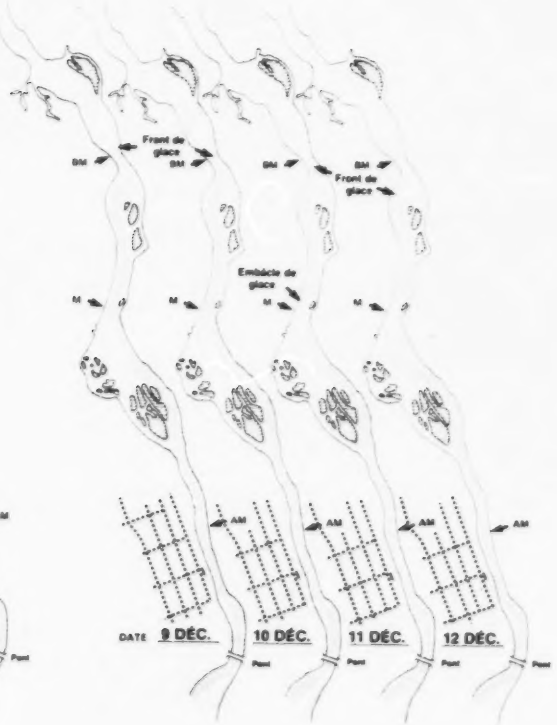
Annexe

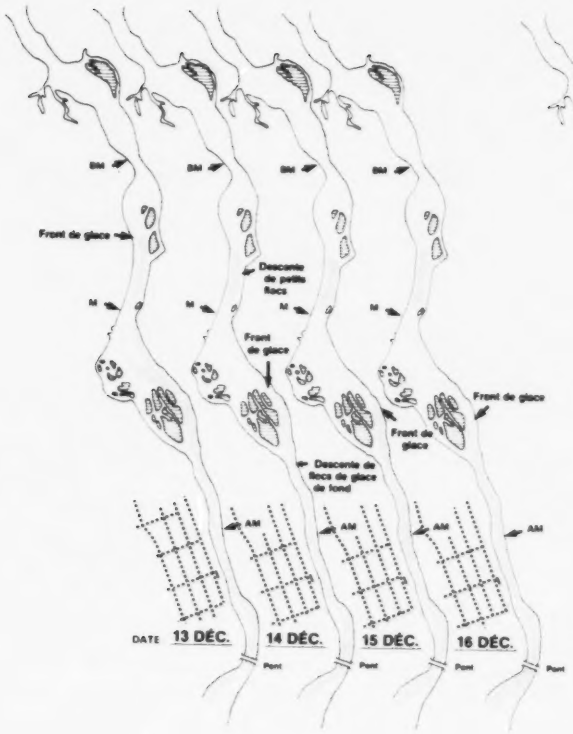
Cartes illustrant l'avance et le recul du manteau glaciel saisonnier en 1984-1985

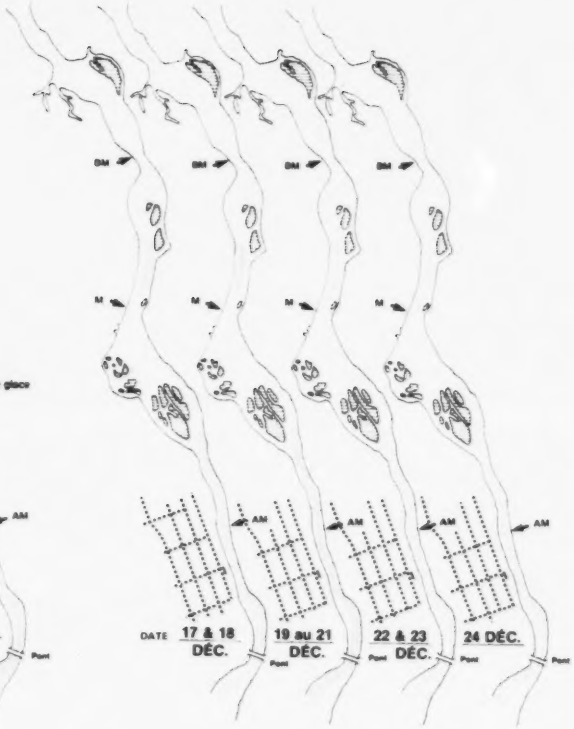

BM
M
AM
DATE 9 NOV.
17 NOV.
20 NOV.
21 NOV.
Pont

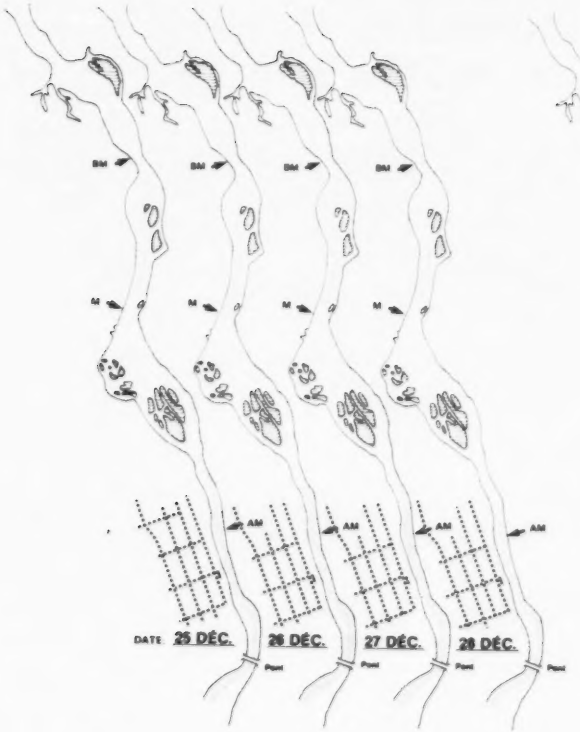

Front de glace
Front de glace
Immobilisation massive
BM
M
AM
DATE 26 NOV.
29 NOV.
2 DÉC.
3 DÉC.
Pont

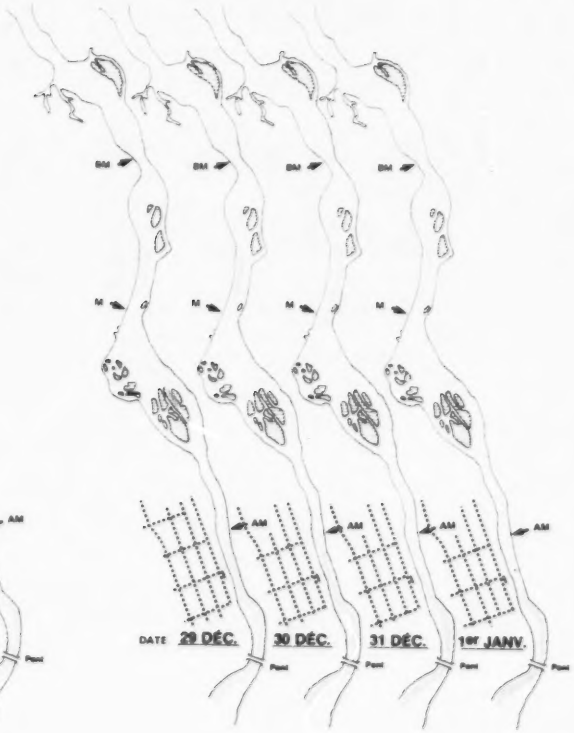

Front de glace
Front de glace
Front de glace
Front de glace
Eau sur la glace
BM
M
AM
DATE 4 DÉC.
5 DÉC.
6 DÉC.
7 & 8 DÉC.
Pont

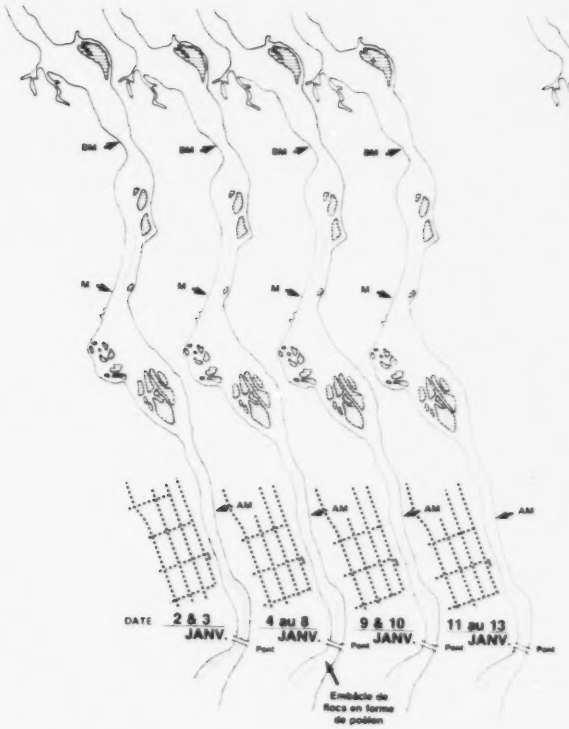

Front de glace
Front de glace
Embâcle de glace
BM
M
AM
DATE 9 DÉC.
10 DÉC.
11 DÉC.
12 DÉC.
Pont

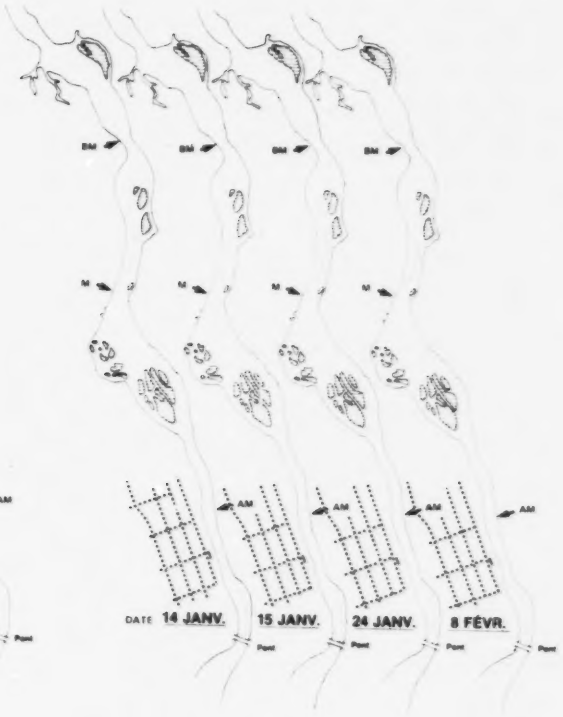

BM
M
AM
Front de glace
Descente de petits flocs
Front de glace
Front de glace
Front de glace
Descente de flocs de glace de fond
DATE 13 DÉC.
14 DÉC.
15 DÉC.
16 DÉC.
Pont

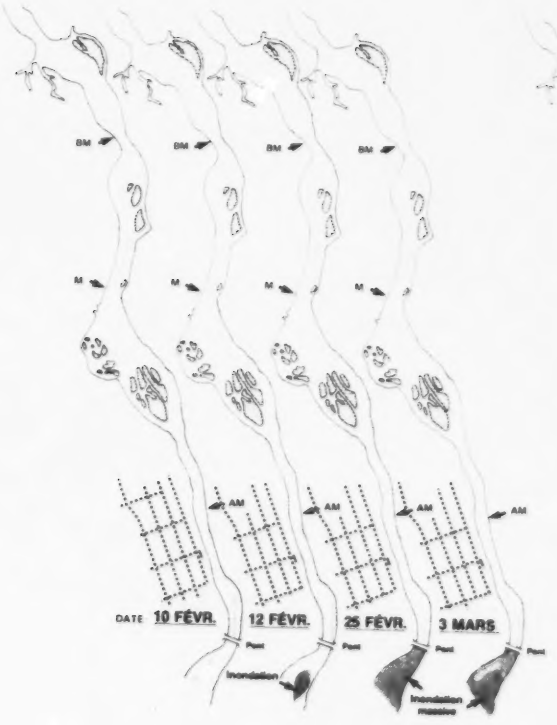

BM
M
AM
DATE 17 & 18 DÉC.
19 au 21 DÉC.
22 & 23 DÉC.
24 DÉC.
Pont

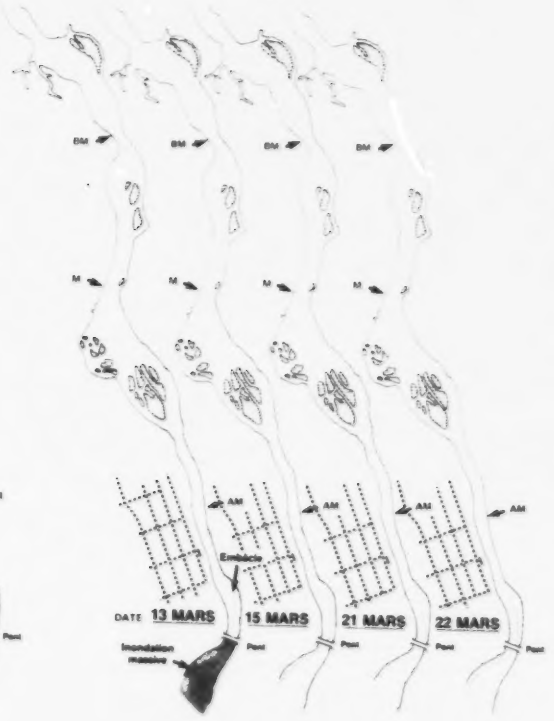

BM
M
AM
DATE 25 DÉC.
26 DÉC.
27 DÉC.
28 DÉC.
Pont

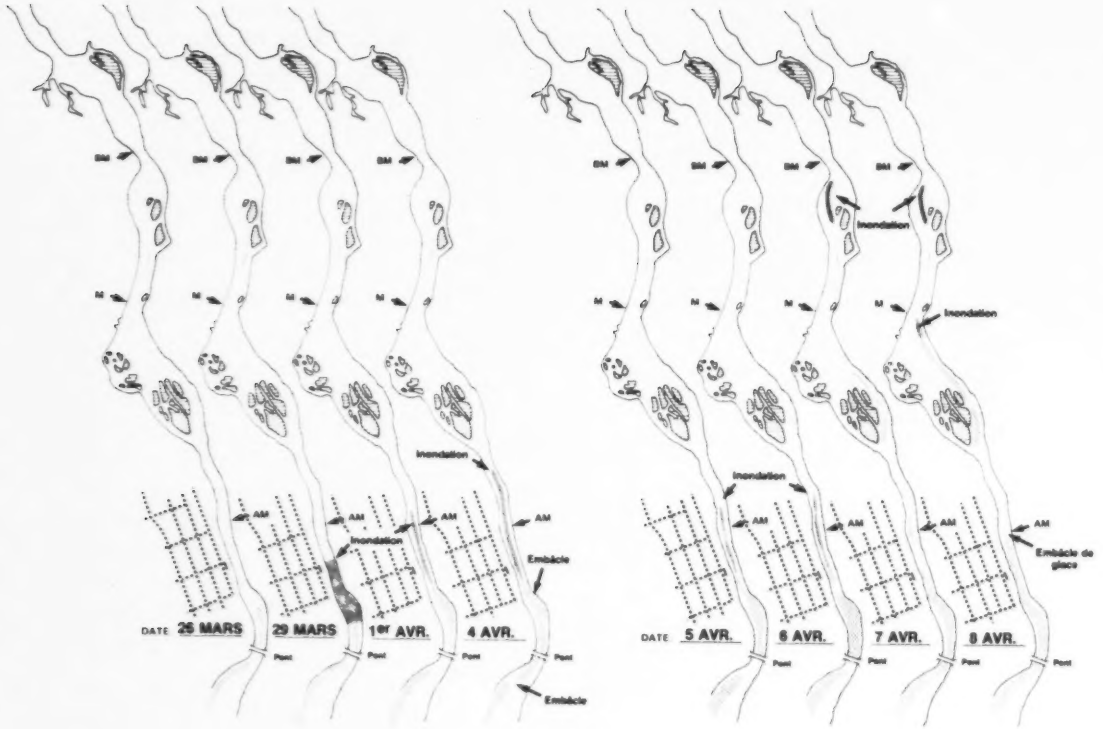

BM
M
AM
DATE 29 DÉC.
30 DÉC.
31 DÉC.
1er JANV.
Pont

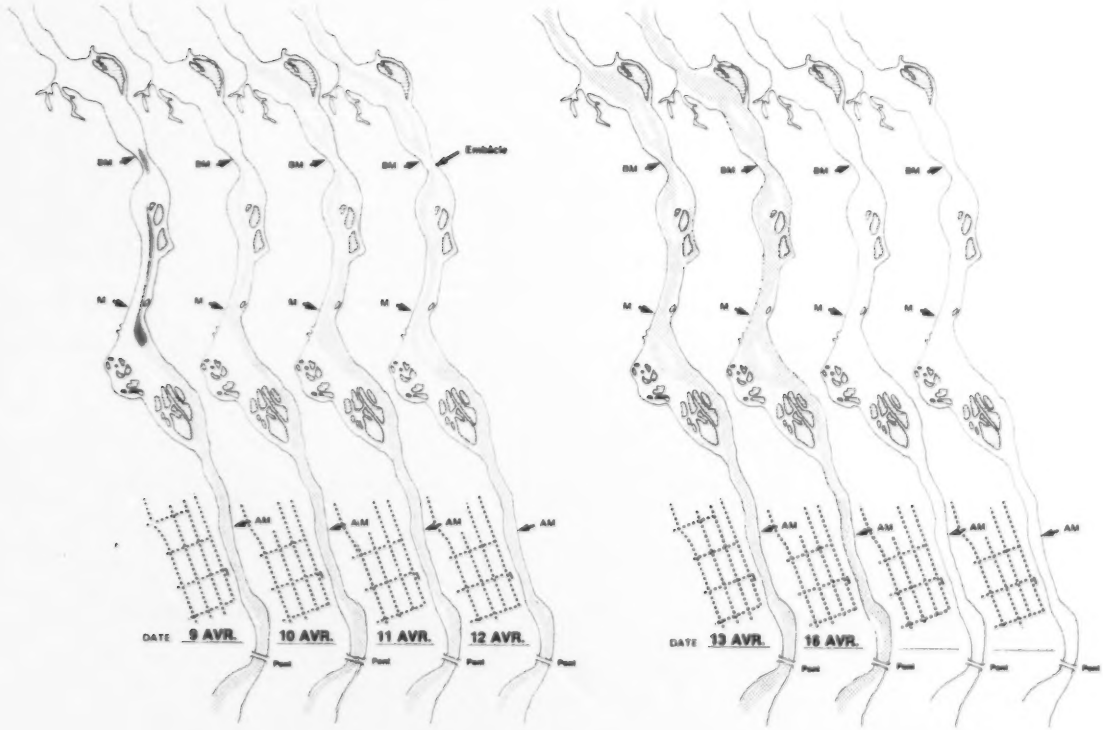

BM
M
AM
Pont
DATE
2 & 3 JANV.
4 au 8 JANV.
9 & 10 JANV.
11 au 13 JANV.
Embâcle de flocs en forme de poêlon


BM
M
AM
Pont
DATE
14 JANV.
15 JANV.
24 JANV.
8 FÉVR.


BM
M
AM
Pont
DATE
10 FÉVR.
12 FÉVR.
25 FÉVR.
3 MARS
Inondation
Inondation massive


BM
M
AM
Pont
Embâcle
DATE
13 MARS
15 MARS
21 MARS
22 MARS
Inondation massive


BM
M
AM
Inondation
Embâcle
Embâcle de glace
Pont
DATE 26 MARS
29 MARS
1er AVR.
4 AVR.
5 AVR.
6 AVR.
7 AVR.
8 AVR.


BM
M
AM
Embâcle
Pont
DATE 9 AVR.
10 AVR.
11 AVR.
12 AVR.
13 AVR.
16 AVR.